

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**  
ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTACIONARIO  
DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA USANDO CURVAS PQ

**AUTOR:**  
SAÚL MAURICIO JAMI SOLIS

**TUTOR:**  
CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

**Quito, septiembre de 2020**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo SAÚL MAURICIO JAMI SOLIS, con documento de identificación N° 172359411-3, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del trabajo de titulación intitulado: ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTACIONARIO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA USANDO CURVAS PQ, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

SAÚL MAURICIO JAMI SOLIS

C.C.: 1723594113

Quito D.M., septiembre de 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTACIONARIO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA USANDO CURVAS PQ” realizado por SAÚL MAURICIO JAMI SOLIS, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., septiembre de 2020



---

Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, Mst.  
C.C. 0503503336

## **DEDICATORIA**

Dedico la idea de este proyecto de grado a mis padres, abuelitos y tíos por ser los pilares de apoyo emocional fundamentales en mi vida, gracias a sus consejos, paciencia y lucha son mi gran ejemplo a seguir.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mi novia, amigos, amigas, primos y familiares por el apoyo incondicional en los momentos buenos y sobre todo en momentos difíciles y por su amor brindado todos los días.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi eterno agradecimiento a Dios por llenar mi vida de bendiciones, a mi padre Rodrigo Jami, mi madre Ligia Solis, a mis abuelitos por ser las personas quienes me guían y me acompaña en todo momento de mi vida

Agradezco a mis maestros de la Universidad Politécnica Salesiana, gracias a ellos aprendí lo que es responsabilidad y ética, en especial al Magister Carlos Barrera, quien me dio su apoyo para la elaboración de este proyecto.

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE .....	v
GLOSARIO .....	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO I.....	3
INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Introducción. ....	3
1.2 Objetivos. ....	4
Objetivo general. ....	4
Objetivo específico.....	4
1.3 Descripción del problema. ....	4
1.4 Limitación y alcance. ....	4
1.5 Estructura del proyecto. ....	5
CAPÍTULO II .....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Sistema Eléctrico de potencia (SEP).....	6
2.2 Líneas de transmisión.....	6
2.2.1 Resistencia de la línea de transmisión.....	7
2.2.2 Capacitancia de la línea de transmisión. ....	7
2.3 Parámetros presentes en la línea de transmisión. ....	8
2.3.1 Resistencia eléctrica de un conductor. ....	8
2.3.2 Reactancia inductiva. ....	9

2.3.3 Capacitancia y reactancia.....	9
2.3.4 Susceptancia.....	10
2.4 Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia. ....	10
2.5 Factores que causan la inestabilidad de voltaje.....	11
2.6 Índices de estabilidad. ....	12
2.7 Colapso de voltaje. ....	13
2.8 Tipos de colapso de voltaje. ....	13
2.8.1 Colapso de voltaje a larga duración. ....	13
2.8.2 Colapso de voltaje clásico. ....	14
2.8.3 Colapso de voltaje transitorio.....	14
2.9 Métodos para evaluar estabilidad de voltaje. ....	14
2.9.1 Curva de la nariz o curva PV. ....	14
2.9.2 Método de curva PQ.....	14
CAPÍTULO III.....	16
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE CURVAS PQ .....	16
3.1 Calculo del flujo de potencia según Newton-Raphson. ....	16
3.2 Curva P-Q para líneas de transmisión.....	18
3.2.1 Ecuación general de segundo grado.....	19
3.2.2 Transformación de coordenadas. ....	19
3.2.3 Traslación de ejes.....	20
3.2.4 Rotación de ejes. ....	20
3.2.5 Región y límites de curva PQ para líneas de transmisión.....	22
3.3 Descripción del programa de simulación.....	23
3.4 DIgSILENT PowerFactory. ....	26
3.5 Sistemas de prueba.....	26
CAPÍTULO IV.....	29

ANÁLISIS DE RESULTADO .....	29
4.1 Resultados del Sistema de 9 barras de la IEEE.....	29
4.2 Análisis y comparación de resultados del Sistema de 9 barras de la IEEE..	32
4.3 Resultados del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ....	37
4.4 Análisis y comparación de resultados del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ....	39
CONCLUSIONES .....	44
RECOMENDACIONES .....	45
REFERENCIAS.....	46



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de la clasificación de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia. ....	11
<b>Figura 2.</b> Método de la curva PQ .....	15
<b>Figura 3.</b> Traslación de ejes. ....	20
<b>Figura 4.</b> Rotación de ejes.....	22
<b>Figura 5.</b> Diagrama de análisis para la obtención de curva PQ. ....	25
<b>Figura 6.</b> Sistema de 9 barras de la IEEE.....	27
<b>Figura 7.</b> Sistemas de Potencia de Grainger & Stevenson.....	28
<b>Figura 8.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 1 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.....	32
<b>Figura 9.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 2 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.....	33
<b>Figura 10.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 3 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.....	34
<b>Figura 11.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 4 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.....	34
<b>Figura 12.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 5 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.....	35
<b>Figura 13.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 6 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.....	36
<b>Figura 14.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 1-2 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ. ....	40
<b>Figura 15.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 2-4 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ. ....	41
<b>Figura 16.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 3-1 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ. ....	41
<b>Figura 17.</b> Límite de estabilidad de voltaje de la línea 4-3 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ. ....	43

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Datos de cargas del sistema de 9 barras de la IEEE.....	27
<b>Tabla 2.</b> Datos de generadores del sistema de 9 barras de la IEEE.....	27
<b>Tabla 3.</b> Datos de cargas del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ....	28
<b>Tabla 4.</b> Datos de generadores del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ..	28
<b>Tabla 5.</b> Parámetros de flujo de las líneas de transmisión del Sistema de 9 barras de la IEEE .....	29
<b>Tabla 6.</b> Coeficientes de las líneas de transmisión del Sistema de 9 barras de la IEEE. ....	30
<b>Tabla 7.</b> Ecuación general de segundo grado de las líneas de transmisión del Sistema de 9 barras de la IEEE.....	30
<b>Tabla 8.</b> Coeficientes de las líneas de transmisión para cálculo del punto de operación del Sistema de 9 barras de la IEEE. ....	31
<b>Tabla 9.</b> Puntos de operación del Sistema de 9 barras de la IEEE.....	31
<b>Tabla 10.</b> Parámetros de flujo de las líneas de transmisión del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ....	37
<b>Tabla 11.</b> Coeficientes de las líneas de transmisión del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ....	37
<b>Tabla 12.</b> Ecuación general de segundo grado de las líneas de transmisión del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.....	38
<b>Tabla 13.</b> Coeficientes de las líneas de transmisión para cálculo del punto de operación del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson. ....	38
<b>Tabla 14.</b> Puntos de operación del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson...	39

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Declaración de variables externas en DPL.....	48
<b>Anexo 2.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	48
<b>Anexo 3.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	49
<b>Anexo 4.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	49
<b>Anexo 5.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	50
<b>Anexo 6.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	50
<b>Anexo 7.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	51
<b>Anexo 8.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	51
<b>Anexo 9.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	52
<b>Anexo 10.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	52
<b>Anexo 11.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	53
<b>Anexo 12.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	53
<b>Anexo 13.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	54
<b>Anexo 14.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	54
<b>Anexo 15.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	55
<b>Anexo 16.</b> Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.....	55

## GLOSARIO

- **Perturbación:** Alteración o trastorno que se produce en el orden o en las características permanentes que conforman una cosa o en el desarrollo normal de un proceso.
- **Estabilidad:** Atributo de un cuerpo de conservarse en equilibrio estable tras sufrir una perturbación.
- **Colapso:** Estancamiento o disminución significativa del ritmo normal de actividades.
- **Metodología:** Conjunto de métodos seguidos en la investigación científica.
- **Potencia activa:** Es la cantidad total de potencia útil consumida por los equipos eléctricos.
- **Potencia reactiva:** Es potencia en la cual la corriente está desfasada con respecto al voltaje y no realiza trabajo real.
- **Resistencia:** Es la oposición al paso de corriente por un conductor.
- **Reactancia:** Es la oposición al paso de corriente alterna por inductores (bobinas) y condensadores.
- **Capacitancia:** Es la capacidad de un elemento o circuito para recolectar y almacenar energía en forma de carga.
- **Susceptancia:** Es la parte imaginaria de la admitancia.
- **Admitancia:** Dentro de un circuito es la facilidad que este ofrece al paso de la corriente eléctrica.

## RESUMEN

Las curvas PQ, son una herramienta vinculada a la evaluación de estabilidad de voltaje en régimen estacionario de sistemas eléctricos de potencia, el método para su elaboración se basada en el uso de los parámetros de líneas de transmisión, así como la solución de flujos de potencia. En este contexto, el presente trabajo propone un método para el análisis de la estabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de potencia, con variables que define su comportamiento, y no varían con el tiempo, aplicando las conocidas curvas PQ.

La metodología de las curvas PQ, es implementada en el software DIgSILENT PowerFactory, mediante el lenguaje de programación que dispone este paquete computacional. La codificación resultante permite evaluar la condición de estabilidad del sistema eléctrico de potencia desde el punto de vista del voltaje, mediante el desarrollo de un procedimiento que, haciendo uso de ecuaciones de segundo grado, así como de arreglos matemáticos de traslación y rotación de ejes, permite reducir la ecuación general ayudando a construir la gráfica PQ con mayor facilidad.

Para probar la metodología, se desarrolla un código general que ayuda a determinar si los sistemas IEEE de 9 barras y del SEP de 4 barras de la referencia Análisis de Sistemas de Potencia de Grainger & Stevenson, son estables mediante la construcción de las curvas PQ. Tras aplicar la metodología se evalúa la estabilidad del sistema, con base en el análisis de las curvas PQ construidas, verificando con esto, las zonas de estabilidad donde el sistema funciona con normalidad, así como las posibles regiones que pueden propiciar un colapso de voltaje.

## **ABSTRACT**

The PQ curves are a tool related to the evaluation of voltage stability in steady state of electrical power systems, the method for their elaboration is based on the use of the parameters of transmission lines, as well as the solution of power flows. In this context, the present work proposes a method for the analysis of the voltage stability in an electrical power system, with variables that define its behavior, and do not vary with time, applying the known PQ curves.

The PQ curve methodology is implemented in the DIgSILENT Power Factory software, using the programming language available in this computational package. The resulting coding allows to evaluate the stability condition of the electrical power system from the voltage point of view, through the development of a procedure that, making use of second degree equations, as well as mathematical arrangements of translation and rotation of axes, allows to reduce the general equation helping to build the PQ graph more easily.

To test the methodology, a general code is developed that helps determine if the IEEE 9-bar and 4-bar SEP systems from the Grainger & Stevenson Power Systems Analysis reference are stable by constructing the PQ curves. After applying the methodology, the stability of the system is evaluated, based on the analysis of the constructed PQ curves, thus verifying the stability zones where the system works normally, as well as the possible regions that can cause a voltage collapse.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción.

Durante años, la estabilidad de voltaje ha sido un tema fundamental para diversos estudios de los sistemas eléctricos de potencia, puesto que es la capacidad del sistema para funcionar en equilibrio y mantener valores de voltaje estables, después de verse afectado por una perturbación que puede traer la paralización total del sistema [1], [2]. De modo que el estudio de estabilidad de voltaje de un sistema eléctrico de potencia tiene gran relevancia para estudiar en detalle los efectos y predicciones de los puntos de colapso y operación del sistema, de manera que el sistema cambia constantemente, puesto que existe un aumento considerable de carga y generación que debe adaptarse [3].

Por lo general, existen dos tipos de métodos para acceder al análisis de estabilidad de voltaje. El primero se basa en el análisis en estado estacionario, el cual modela el flujo de potencia, mediante ecuaciones algebraicas, porque tiene como ventaja proporcionar información para un análisis más factible de sistemas grandes, y además de múltiples estudios de contingencia sobre el margen de sensibilidad y estabilidad, gracias a su velocidad de cálculo. Por otro lado el análisis en estado dinámico consiste en un conjunto de ecuaciones diferenciales, que explica el estado del sistema por los diferentes eventos que dirigen a la inestabilidad del voltaje, la desventaja del análisis dinámico es que su tiempo de cálculo puede ser muy largo [1], [3].

El fin del presente trabajo es realizar un estudio sobre la estabilidad de voltaje en estado estacionario aplicando curvas PQ, debido a que se puede ver un crecimiento incesante de usuarios que demandan energía eléctrica, lo que tiene como consecuencia que los sistemas eléctricos de potencia funcionen cerca de su límite de estabilidad, por esto se ha hecho énfasis en realizar un análisis genérico de la estimación de la estabilidad del voltaje por medio de gráficos representativos de la operación y parámetros de un sistema eléctrico de potencia.

## **1.2 Objetivos.**

### **Objetivo general.**

Evaluar la estabilidad de voltaje en un sistema eléctrico de potencia en estado estacionario aplicando curvas de potencia activa versus potencia reactiva (PQ).

### **Objetivo específico.**

Estudiar la estabilidad de voltaje en régimen estacionario y los distintos efectos que derivan en su inestabilidad.

Formular las curvas PQ como método para evaluar la estabilidad de voltaje en estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia.

Desarrollar un código general que permita determinar si cualquier sistema de potencia es estable en voltaje estacionariamente, mediante la implementación del método de las curvas PQ.

## **1.3 Descripción del problema.**

En los últimos años, debido a diferentes factores como el crecimiento continuo de la demanda, han incrementado el número de apagones por colapso de voltaje, por lo tanto, la estabilidad de voltaje se ha convertido en un tema básico para diversos estudios de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). La estabilidad de voltaje en estado estacionario es uno de los tópicos asociados al estudio de la estabilidad de voltaje, siendo las curvas PQ una de sus herramientas de análisis. Estas curvas no se encuentran implementadas dentro de softwares de simulación comerciales, siendo esta la debilidad detectada, sobre la cual este trabajo quiere tomar como partida para generar una aplicación que permita formar estas curvas en cualquier sistema de potencia; para identificar los puntos débiles y tomar medidas correctivas o preventivas.

## **1.4 Limitación y alcance.**

Para iniciar con el trabajo, se llevará a cabo una revisión bibliográfica, sobre estabilidad de voltaje y además una investigación acerca de fenómenos que influyen en la inestabilidad del sistema eléctrico de potencia desde el punto de vista del voltaje.

Basado en las referencias bibliográficas, el presente trabajo de titulación se limita al análisis de todos los posibles puntos de estabilidad de voltaje en estado estacionario aplicando curvas PQ; obteniéndose una metodología de análisis genérica por medio de estos gráficos representativos de la operación y parámetros de un sistema de potencia.



Este proyecto se enfoca en la construcción de las curvas PQ, para el estudio de estabilidad de voltaje, las cuales se obtendrán en el software DIgSILENT PowerFactory mediante su lenguaje de programación propio llamado DPL.

El producto que se obtendrá de este proyecto técnico es un código general y aplicable a cualquier sistema eléctrico de potencia, el cual puede ser empleado con propósitos académicos. Se probará la programación DPL sobre el sistema IEEE de 9 barras, además del SEP de 4 barras de la referencia Análisis de Sistemas de Potencia de Grainger & Stevenson.

### **1.5 Estructura del proyecto.**

En este punto se presenta cada uno de los capítulos que está compuesto este trabajo de titulación.

Capítulo 1: Presenta brevemente una descripción sobre el estudio de la estabilidad del voltaje en estado estacionario, y la descripción de como las curvas PQ pueden ayudar al estudio y análisis de la estabilidad de un SEP. Se señala claramente los objetivos generales y específicos que se debe cumplir en el presente trabajo. Asimismo, se presenta limitaciones y alcances dejando en claro la razón del proyecto.

Capítulo 2: Se proporciona una visión general sobre la estabilidad dentro de un sistema eléctrico de potencia, y se realiza una revisión acerca del concepto del colapso de voltaje. Se destaca así el método para el estudio y análisis de estabilidad de voltaje y una herramienta auxiliar que son las curvas PQ.

Capítulo 3: Se da una breve introducción del programa DIgSILENT PowerFactory el cual tiene funciones definidas que nos ayudará a encontrar los parámetros para la obtención de la curva PQ. Además, se presentan los modelos para realizar el estudio de estabilidad mediante un flujo de potencia, y armando la ecuación de segundo grado para posteriormente aplicar la transformación de coordenadas (traslación y rotación) y así obtener las curvas de estabilidad PQ.

Capítulo 4: Se muestran los resultados de las simulaciones con la finalidad de saber que el programa funciona para el análisis de estabilidad de voltaje mediante las curvas PQ, también se muestran las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Sistema Eléctrico de potencia (SEP).**

Un sistema eléctrico de potencia (SEP), es un conjunto de dispositivos, conductores y equipos necesarios para la generación, conversión y distribución de energía eléctrica considerando que el crecimiento de los sistemas eléctricos siempre ha mantenido el ritmo del progreso tecnológico de la sociedad [4].

Cuando todos los componentes de un SEP en un régimen estacionario operan dentro de sus límites operativos, y con índices de calidad que están determinados por la magnitud de voltaje y la frecuencia, si la transmisión de energía eléctrica no presenta interrupciones está se encuentra en un estado de funcionamiento normal [5].

#### **2.2 Líneas de transmisión.**

Las líneas de transmisión son las responsables de transportar una gran cantidad de energía eléctrica desde el sitio donde se genera hasta el sitio donde se distribuye y se consume. Pueden ser de varios tipos según su nivel de voltaje, potencias que transmiten y construyen: alto y bajo voltaje, alta y baja potencia, líneas aéreas, líneas subterráneas.

Las líneas de transmisión están compuestas básicamente por los siguientes elementos.

**Conductores:** Es un cuerpo utilizado como conductor o portador de corriente eléctrica, el cual se ve sujeto a una diferencia de potencia entre los extremos del conductor; este atributo se llama conductividad.

**Aislador:** Los aisladores en líneas de transmisión se utilizan principalmente para que los conductores no se muevan y así evitar la fuga de corriente hacia tierra, además de evitar pérdidas de energía.

**Soporte o estructura:** El soporte cumple con la función de mantener a los conductores a una distancia prudente entre ellos para evitar arcos eléctricos.

La selección de un soporte en los sistemas de transmisión depende de un análisis económico, ya que existe variedad de soportes o estructuras ,que por lo general son de metal o de hormigón [6].

### 2.2.1 Resistencia de la línea de transmisión.

La resistencia es propia de los materiales y se oponen al paso de la corriente eléctrica, en el sistema de transmisión eléctrica la resistencia se convierte en un factor que se debería eliminar, ya que dicho factor se convierte en la principal causa de pérdidas de potencia durante la transmisión de energía [7].

La resistencia efectiva de un conductor es:

$$R = \frac{\text{Pérdida de Potencia}}{I^2} \quad (1)$$

Donde:

R: es la resistencia efectiva en ohmios.

I: es la intensidad de corriente.

### 2.2.2 Capacitancia de la línea de transmisión.

La capacitancia de la línea de transmisión es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores, lo que hace que los conductores se carguen de la misma manera que las placas de un condensador cuando hay paso de corriente.

Cuando las líneas de transmisión son de longitud corta, es decir menor a los 80 km, el valor de la capacitancia se desprecia, sin embargo, para longitudes medianas que están entre los 80 km y 200 km y líneas largas que son mayores a los 200 km, el impacto de la capacitancia es de mayor importancia para una mejor efectividad en la transmisión de las líneas.

$$C = \frac{\pi * k}{\ln \frac{DMG}{R}} \frac{F}{m} \quad (2)$$

Donde:

C: es la capacidad entre conductores en faradios por metro.

K: es una constante de permisividad.

R: es el radio del conductor.

DMG: es la distancia media geométrica.

### **2.3 Parámetros presentes en la línea de transmisión.**

Las líneas de transmisión son la forma física por la cual se realiza la transmisión de una gran cantidad de energía eléctrica por largas distancias, usualmente están constituidos por conductores desnudos sujetos por aisladores y apoyados en torres.

Las líneas de transmisión están compuestas por varios parámetros como, por ejemplo, resistencia, inductancia, capacitancia, susceptancia y conductancia, los cuales por medio del estudio y el análisis son fundamentales para que la función del sistema eléctrico de potencia se pueda cumplir.

La aplicación de los parámetros los cuales son distribuidos tiene un rol muy necesario para la operación, diseño y resguardo de las líneas de transmisión, por lo que es obligatorio realizar los cálculos correspondientes para optimizar su rendimiento [8].

La resistencia (R): se conceptualiza como el paso de la corriente de energía eléctrica de las líneas de transmisión, por lo que depende de la resistencia de los conductores y su unidad se representa [Ohm “ $\Omega$ ”] [9].

La inductancia: se la representa con la letra (L), su unidad de medida es el Henrio [“H”], y es la oposición cuando existe un cambio de corriente, aunque se encuentra en presencia de un campo magnético.

La capacitancia (C): esta se produce de la línea de transmisión, porque esta conforma por dos o más conductores los cuales están separados por dos aislantes lo cual se puede constituir en un condensador, y almacena energía la cual depende la geometría de conductores, la distancia y la constante dieléctrica que los separa, está distribuida a lo largo de las líneas por lo tanto el valor incrementa cuando la longitud y el voltaje sea mayor. La unidad de medida se expresa en Faradios [“F”].

Conductancia (G): se presenta entre conductores y esta surge por una fuga de corriente que se encuentra en los aisladores de las torres de transmisión, por lo cual dicha fuga se considera despreciable o mínima, y se representa en unidad Siemens [“S o  $\Omega^{-1}$ ”] [10].

#### **2.3.1 Resistencia eléctrica de un conductor.**

Es una de las magnitudes necesarias para medir la electricidad, es la mayor o menor oposición que presenta un cuerpo al paso de una corriente eléctrica, y presentan roces con algunas partículas atómicas, por esta razón, se presenta una pérdida de energía en cada una de ellas, y esto depende de las propiedades físicas de los materiales del

conductor por donde recorre la corriente eléctrica y se la considera una caída de potencia por medio de conductores [11].

### 2.3.2 Reactancia inductiva.

Es la capacidad que tiene un inductor en disminuir la corriente eléctrica de un circuito de corriente alterna, según la Ley de Lenz la acción que realiza un inductor es la que se opone a cualquier cambio en la corriente. Se sabe que la corriente alterna sufre constantes cambios, por lo que un inductor reacciona de la misma manera, y por esta razón reduce la corriente en un circuito de corriente alterna.

La reactancia inductiva es un patrón que se basa en la frecuencia del sistema, y el valor de la inductancia total por lo que es el resultado de la suma entre la inductancia interna y externa de los conductores.

$$X_L = 2\pi fL \quad (3)$$

Calculo para una frecuencia de 60Hz y empleando logaritmos decimales:

$$X_L = 2\pi f \cdot 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \frac{\Omega}{km} \quad (4)$$

Donde:

DMG: es la distancia media geométrica.

RMG: es el radio medio geométrico de los conductores.

f: es la frecuencia [Hz].

L: es el valor de la inductancia [H].

### 2.3.3 Capacitancia y reactancia.

La expresión de la capacitancia entre dos conductores es:

$$C = \frac{q}{v} \quad (5)$$

Donde:

q= carga entre los conductores  $\frac{C}{km}$

v= diferencia de potencia en voltios.

En los cables aislados, la capacitancia se calcula dependiendo de su construcción y diseño, así como también el material y espesor del aislamiento.

Si se analiza dicho parámetro de una línea de transmisión, se ve que la diferencia de potencia de los conductores produce que se cargue como las placas de un condensador, así que las capacitancias entre los conductores paralelos tendrán un valor constante, dependiendo de la separación y el tamaño de los conductores.

Cuando se aplica una corriente alterna a una línea de transmisión, producirá que la carga de los conductores aumente o disminuya dependiendo de los valores instantáneos de la corriente entre conductores, la corriente de carga está presente en la línea de transmisión sin importar si el circuito de carga está abierto, y esto produce una caída de tensión en toda la línea, por lo tanto también afecta el rendimiento, el factor de potencia y la estabilidad de la red a la cual forma parte la línea [12], [13].

Se puede encontrar la reactancia capacitiva presente entre el conductor mediante la siguiente ecuación:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (6)$$

Donde:

f: es la frecuencia [Hz].

C: es el valor de la capacitancia [F].

#### **2.3.4 Susceptancia.**

Es la parte imaginaria de una admitancia y su unidad de medida es al igual que la conductancia es el [Siemens “S o  $\Omega^{-1}$ ”].

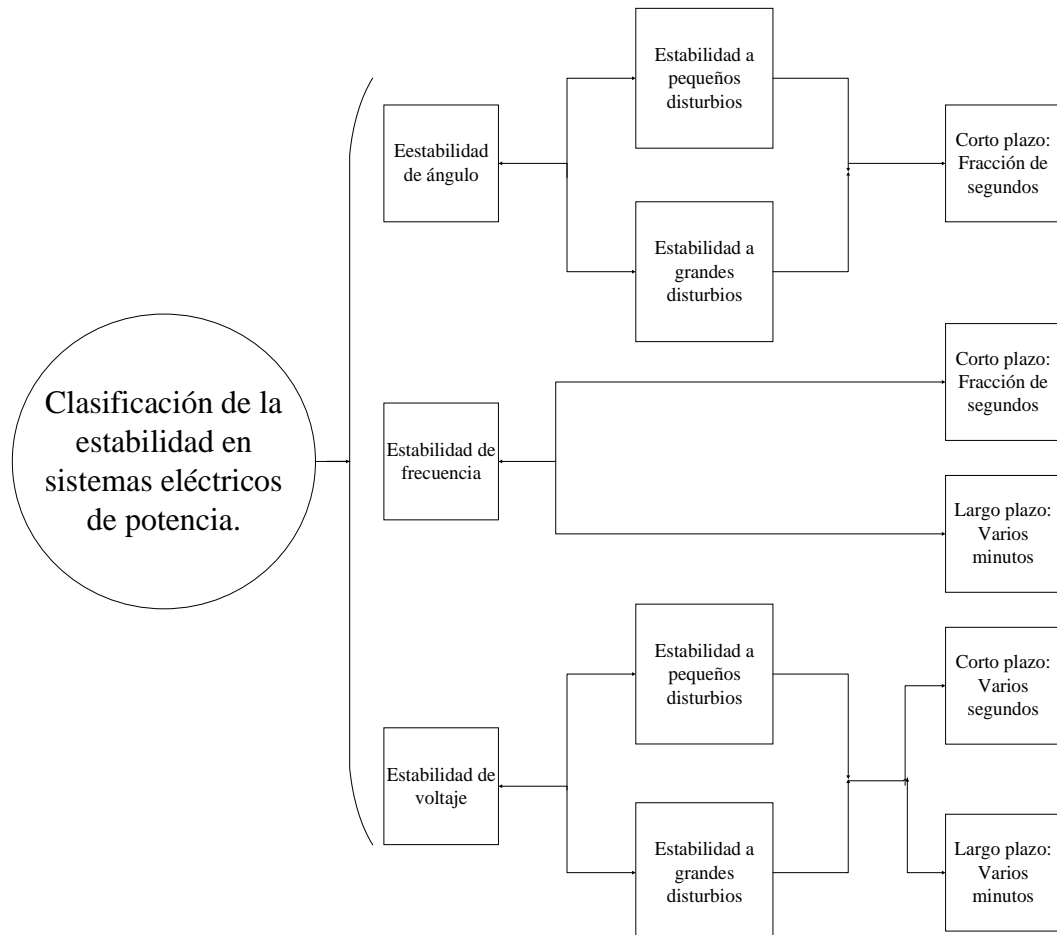
Sabiendo que la admitancia es el inverso de la impedancia tenemos la siguiente ecuación. La susceptancia se representa con la letra (B) [14].

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (7)$$

#### **2.4 Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia.**

La estabilidad de voltaje de los sistemas eléctricos de potencia se define como la capacidad del sistema para funcionar en equilibrio y mantener valores de voltaje estables, después de verse afectado por una perturbación física [15]. En este proyecto se trabaja a la estabilidad de voltaje mediante la aplicación de curvas PQ.

Estabilidad de voltaje, es la capacidad del SEP de mantener las magnitudes de voltaje estable en los nodos del sistema después de una anomalía o perturbación, dicha estabilidad se puede analizar en régimen transitorio o estacionario[16][17].



**Figura 1.** Esquema de la clasificación de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia.  
Elaborado por: Saúl Jami

## 2.5 Factores que causan la inestabilidad de voltaje.

Para que dentro del sistema eléctrico de potencia se produzca una inestabilidad de voltaje existen varias causas, las cuales podrían ser desde reanudar la carga dinámica, limitaciones tanto en la producción de potencia reactiva en generadores como en la transmisión de potencia reactiva, el cual es un producto de pérdida de reactivos en líneas de transmisión altamente cargadas, de igual forma el aumento de la demanda de reactivos de la carga puede ser una causa que genere la inestabilidad de voltaje [18].

Existen varias alternativas que pueden ayudar a la estabilidad de voltaje entre ellas: mantener un control del voltaje de la red, tener una sincronización entre equipos y requerimientos del sistema.

## 2.6 Índices de estabilidad.

La idea principal de los índices basados en mediciones es utilizar la información de magnitudes de voltaje o corriente, en los puntos donde se realiza el análisis de mediciones del SEP, que pueden proporcionar directamente información sobre la inestabilidad de voltaje. Algunas implementaciones que utilizan esta metodología, también requieren de parámetros del SEP (resistencias, reactancias, entre otros) [19].

Considerando un sistema de energía grande o un generador equivalente, que transfiere energía a un centro de carga a través de una línea de transmisión. Usando las constantes de circuito generalizadas (ABCD) de la línea, la ecuación de voltaje del sistema puede ser escrito como:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (8)$$

En forma rectangular, las constantes A y B se pueden expresar como:

$$A = (a_1 + ja_2) \text{ and } B = (b_1 + jb_2) \quad (9)$$

La corriente que circula por la línea de transmisión se puede escribir como:

$$I_R = (S/V_R) = (P + jQ)/V_R \quad (10)$$

La ecuación del voltaje se puede reescribir

$$V_S = (a_1 + ja_2)V_R + (b_1 + jb_2)(P + jQ)/V_R \quad (11)$$

Para una carga dada (P y Q) y magnitud de voltaje final de envío (Vs).

Una potencia aparente máxima denominada generalmente como  $S_{max}$  correspondiente a los índices para la estabilidad este parámetro equivalente se calcula como:

$$S_{max} = \frac{|\overline{E_{eq}}|^2 \sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{2(R_{eq} + X_{eq} \cdot \tan \theta \pm \sqrt{(R_{eq}^2 + X_{eq}^2)(1 + \tan^2 \theta)})} \quad (12)$$



La idea principal es monitorear las condiciones de estabilidad de voltaje utilizando los valores resultantes de las variables relacionadas, cada vez que se recopile una nueva medición, el límite de estabilidad se recalcula y se muestra en el plano PQ. Los valores de Pmax y Qmax, se derivan de la siguiente manera:

$$P_{max} = \frac{|\overline{E_{eq}}|^2}{2(R_{eq} + |\overline{Z_{eq}}|)} \quad (13)$$

$$Q_{max} = \frac{|\overline{E_{eq,t}}|^2}{2(X_{eq} + |\overline{Z_{eq}}|)} \quad (14)$$

Donde:

$$|\overline{Z_{eq}}| = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (15)$$

## 2.7 Colapso de voltaje.

El colapso de voltaje es uno de los problemas presentes de la estabilidad en sistemas eléctricos de potencia y se caracteriza principalmente por una reducción inicial en la magnitud del voltaje de forma lenta, para finalizar con una caída brusca, este proceso se realiza durante algunos segundos y puede durar hasta aproximadamente 30 minutos.

De igual manera el colapso de voltaje puede suceder cuando existe una falta de capacidad del sistema eléctrico, para suministrar la demanda de la red de potencia, también puede ocurrir cuando se presenta una incapacidad de mantenerse ante cualquier perturbación durante largo tiempo. Por dichas condiciones el sistema colapsa y los valores de voltaje se encuentran por debajo de los límites normales.

## 2.8 Tipos de colapso de voltaje.

### 2.8.1 Colapso de voltaje a larga duración.

Aquí existe una línea de acople que separa las áreas de carga de las unidades de generación, cuando esta línea de acople se llega a perturbar es casi imposible que el voltaje se mantenga dentro del límite operativo, y se produce una falla de transmisión que puede tardar varios minutos en recuperarse.

### **2.8.2 Colapso de voltaje clásico.**

Cuando el sistema de potencia esta interconectado con una generación dispersa, y no cuanta con la suficiente potencia reactiva para suministrar las necesidades tanto de la carga como del sistema, y el voltaje disminuye a tal punto que el sistema no puede recuperarse y por ende colapsa, esto demora de entre 1 a 5 minutos.

### **2.8.3 Colapso de voltaje transitorio.**

Se presenta cuando en dos áreas del sistema dejan de tener sincronización, de igual manera se produce cuando se reinician motores de inducción de gran tamaño, los cuales pueden estar bloqueados y esto genera oscilación de potencia reactiva encaminada al colapso del voltaje, tardando hasta 15 segundos [20].

## **2.9 Métodos para evaluar estabilidad de voltaje.**

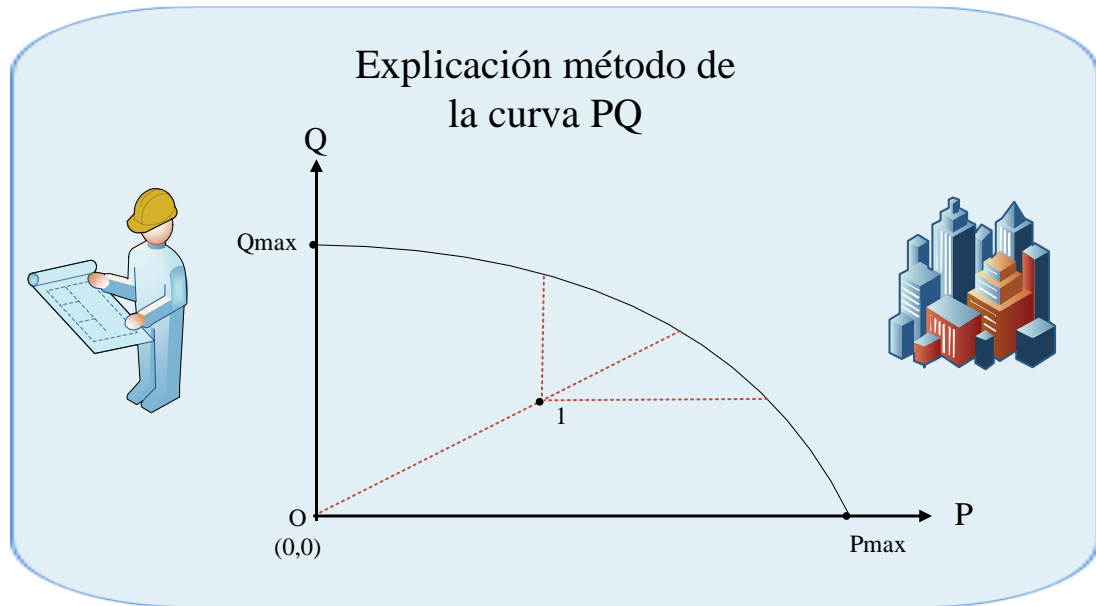
### **2.9.1 Curva de la nariz o curva PV.**

En muchas prácticas a nivel industrial, en los estudios de estabilidad se consideran las curvas que relacionan el voltaje y la potencia activa o potencia reactiva, conocidas como PV y QV respectivamente. Estas curvas generalmente son usadas para establecer el límite de estabilidad de voltaje en estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia, para delimitar el límite de estabilidad, e identificar el punto de colapso de voltaje [21].

### **2.9.2 Método de curva PQ.**

A medida que aumenta la carga en una red eléctrica producto de mayores necesidades de consumo energético, el factor de potencia dentro del SEP va cambiando, por lo tanto, se dificulta trazar las curvas PV en tiempo real de sistemas grandes con diferentes factores de potencia. Para resolver este problema, se propone el método de curvas PQ para evaluar el margen de estabilidad de voltaje [3].

En cargas de rendimiento constantes, cuando la carga de potencia real o la carga de potencia reactiva excede sus límites, ocurren problemas de estabilidad de voltaje, en consecuencia, la curva PQ pretende utilizar los indicadores más importantes; es decir la potencia activa y la potencia reactiva, para poder graficar el área limite como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 2.** Método de la curva PQ  
Elaborado por: Saúl Jami

Donde el punto 1 representa el punto de operación actual, la idea de la curva PQ es cuando un punto de operación está dentro del área el sistema se encontraría estable, y si el punto de operación está fuera del área restringida, el sistema entra a un estado de inestabilidad. La curva de limite se traza en coordenadas PQ, y fundamentalmente en una parábola, que se puede expresar usando la siguiente ecuación.

$$Q = a P^2 + b P^2 + c \quad (16)$$

### CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE MEDIANTE CURVAS PQ

Existen varias metodologías para analizar la estabilidad de voltaje, en el presente trabajo consiste en un método estacionario y de acuerdo con un SEP utilizado como modelo, para observar el punto de equilibrio del sistema dentro de esta categoría, se basa en un análisis usando parámetros generalizados y mediante un proceso matemático de traslación y rotación de ejes, que se utiliza para resolver ecuaciones canónicas de la curva PQ de una línea de transmisión.

Esto generalmente se basa en resolver ecuaciones de traslación y rotación, a medida que se resuelve la ecuación general se va reduciendo, hasta llegar a la ecuación de una parábola, y poder determinar el punto de colapso de voltaje. Después de eso se consigue una medida en forma de indicadores como márgenes de potencia activa y reactiva entre otros, para el grado de estabilidad del SEP en condiciones específicas de operación en el estudio estático no se considera un comportamiento dinámico de los elementos. Al ser este un análisis en estado estacionario tiene como parte inicial la solución de un flujo de potencia.

### 3.1 Cálculo del flujo de potencia según Newton-Raphson.

El planteamiento de este método se fundamenta en la extensión de la función no lineal de la serie de Taylor, esta serie es limitada y truncada en la primera derivada convirtiéndola en un proceso iterativo y es necesario plantear ecuaciones de potencia activa y potencia reactiva, además de las ecuaciones en función de los voltajes y ángulos correspondientes [22].

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{Pl} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \cdot V_j \quad (17)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{Pl} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \cdot V_j \quad (18)$$

La ecuación de error de potencias está dada por.

$$\Delta P = P^{especificado} + P_D - P^{calculado} \quad (19)$$

$$\Delta Q = Q^{especificado} + Q_D - Q^{calculado} \quad (20)$$

El sistema de ecuaciones en forma matricial está dado por.

$$\Delta S = [J].\Delta X \quad (21)$$

Donde:

$\Delta X$  : es el vector de corrección de variables.

$[J]$  : se la conoce generalmente como la matriz Jacobiano de derivadas parciales en relación con la variable de estado desconocida, la cual está compuesta por cuatro submatrices [23].

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & V \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & V \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Dichas submatrices Jacobianas están dados por las ecuaciones:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i(G_{ij}\text{sen}\theta_{ij} - B_{ij}\text{cos}\theta_{ij})V_j \quad (23)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i(G_{ij}\text{cos}\theta_{ij} + B_{ij}\text{sen}\theta_{ij})V_j \quad (24)$$

$$V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i(G_{ij}\text{cos}\theta_{ij} + B_{ij}\text{sen}\theta_{ij})V_j \quad (25)$$

$$V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) V_j \quad (26)$$

En el caso particular de las barras que se conoce la potencia P y su voltaje es fijo V y la potencia reactiva Q, no se especifica y por este motivo no se puede escribir la ecuación de potencia reactiva, la matriz Jacobiano se puede ver reducida en sus dimensiones [22].

### 3.2 Curva P-Q para líneas de transmisión.

Al usar las constantes de circuito generalizadas (ABCD) de la línea y las conocidas curvas PV convencionales, la carga en un nodo receptor para el borde del colapso de voltaje se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$(c_3^2 - 4c_1c_4)Q_R^2 + (2c_2c_3)Q_R P_R + (c_2^2 - 4c_1c_4)P_R^2 - (2c_3|Vs^2|)Q_R - (2c_2|Vs^2|)P_R + |Vs^4| = 0 \quad (27)$$

Donde:

$$\begin{aligned} c_1 &= (1 - X_L B_C)^2 + (R B_C)^2 \\ c_2 &= 2R \\ c_3 &= 2[X_L - X_L^2 B_C - R^2 B_C] \\ c_4 &= (R)^2 + (X_L)^2 \end{aligned} \quad (28)$$

Donde.

R: es la resistencia de la línea.

$X_L$ : es la reactancia de la línea.

$B_C$ : es la susceptancia de la línea.

El cálculo de estos coeficientes también sirve para considerar los ejes de referencia para la curva PQ.

Por lo tanto, existen dos casos para considerar los ejes.

1. Primer caso cuando  $c_3^2 \geq c_2^2$ .

Los ejes se giran en sentido antihorario donde los ejes P Q se definen como los ejes vertical y horizontal respectivamente, es decir: el eje x=Q y el eje y=P, este es el caso más común que existe.

2. Segundo caso cuando  $c_3^2 \leq c_2^2$ .

Los ejes se giran en sentido antihorario donde los ejes Q P se definen como los ejes vertical y horizontal respectivamente, es decir: el eje  $x=P$  y el eje  $y=Q$  [24].

### 3.2.1 Ecuación general de segundo grado.

Este apartado se empieza con una definición de la ecuación general de segundo grado, donde las variables  $(x, y)$ , está dada por una expresión de la forma.

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (29)$$

Donde los coeficientes A, B, C no son nulos al mismo tiempo, es decir, algunos de estos valores son diferentes de cero.

Los coeficientes de los valores de segundo grado son los que dan significado a la curva correspondiente a la ecuación, ya sea una elipse, parábola o una hipérbola, y todas son llamadas generalmente como curvas de segundo grado, porque cada una de ella está representada por una ecuación de segundo grado, entonces se demuestra que sí:

$$\begin{aligned} B^2 - 4AC < 0, & \text{ la curva es una elipse} \\ B^2 - 4AC = 0, & \text{ la curva es una parábola} \\ B^2 - 4AC > 0, & \text{ la curva es una hipérbola} \end{aligned} \quad (30)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= c_3^2 - 4c_1c_4 \\ B &= 2c_2c_3 \\ C &= c_2^2 - 4c_1c_4 \\ D &= -2c_3|Vs|^2 \\ E &= -2c_2|Vs|^2 \\ F &= |Vs|^4 \end{aligned} \quad (31)$$

### 3.2.2 Transformación de coordenadas.

Tanto en geometría como en física es fundamental determinar un sistema de referencias o coordenadas, con el fin de poder simplificar la ecuación para que el proceso de solución sea más fácil, rápido y posible, para lograr todo aquello se realiza

una transformación de ejes coordenados, por lo que el proceso solo queda en hacer dos movimientos uno es de traslación y otro de rotación.

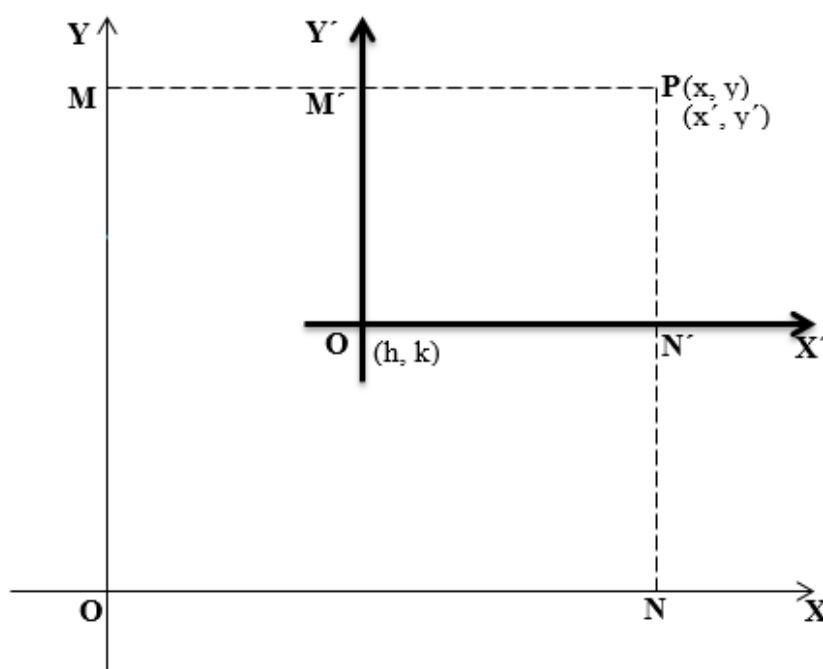
### 3.2.3 Traslación de ejes.

Sean  $X$  y  $Y$  los ejes primitivos y  $X'$  y  $Y'$ , paralelos respectivamente a los anteriores, los nuevos ejes. Sean también  $(h, k)$  las coordenadas de  $O'$  con respecto al sistema inicial.

Supongamos que  $(x, y)$  son las coordenadas de un punto  $P$  con respecto a los ejes primitivos y  $(x', y')$  las coordenadas, del mismo punto, respecto de los nuevos.

Para determinar  $(x, y)$  en función de  $(x', y')$ , por lo tanto, las ecuaciones de la traslación de ejes son:

$$\begin{aligned} x &= h + x' \\ y &= k + y' \end{aligned} \quad (32)$$



**Figura 3.** Traslación de ejes.  
Elaborado por: Saúl Jami.

### 3.2.4 Rotación de ejes.

Sean  $X$  y  $Y$  los ejes primitivos y  $X'$  y  $Y'$  los nuevos siendo  $O$  el origen común de ambos sistemas, representamos por  $\theta$  el ángulo  $X'OX$  de la rotación.



Supongamos que  $(x, y)$  son las coordenadas de su punto P del plano con respecto a los ejes primitivos, y  $(x', y')$  las coordenadas, del mismo punto con respecto de los nuevos. Para determinar  $(x, y)$  en función de  $(x', y')$ , por lo tanto, las fórmulas de rotación  $\theta$  de los ejes coordenados son [25]:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \theta + y' \sin \theta \\ y &= -x' \sin \theta + y' \cos \theta \end{aligned} \quad (33)$$

Donde:

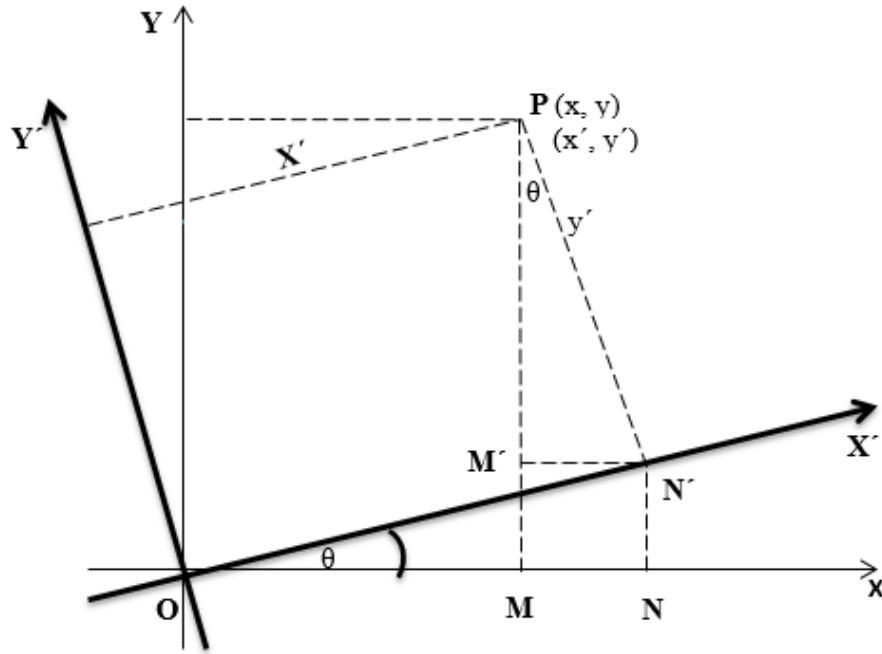
$\sin \theta$  y  $\cos \theta$ , depende de como estan los ejes xy.

1. Primer caso cuando  $c_3^2 \geq c_2^2$ .

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \sqrt{\frac{1 - \cos 2\theta}{2}} \\ \sin \theta &= \frac{|c_2|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}} \\ \cos \theta &= \sqrt{\frac{1 + \cos 2\theta}{2}} \\ \cos \theta &= \frac{|c_3|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}} \end{aligned} \quad (34)$$

2. Segundo caso cuando  $c_3^2 \leq c_2^2$ .

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \sqrt{\frac{1 - \cos 2\theta}{2}} \\ \sin \theta &= \frac{|c_3|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}} \\ \cos \theta &= \sqrt{\frac{1 + \cos 2\theta}{2}} \\ \cos \theta &= \frac{|c_2|}{\sqrt{c_3^2 + c_2^2}} \end{aligned} \quad (35)$$



**Figura 4.** Rotación de ejes.  
Elaborado por: Saúl Jami.

### 3.2.5 Región y límites de curva PQ para líneas de transmisión.

Para determinar el área segura o estable de una línea de transmisión se aplica.

$$\begin{aligned} c_5 &= (c_3^2 - 4c_1c_4) \\ c_6 &= 2(c_2c_3P_o - c_3|V_s|^2) \\ c_7 &= (c_2^2 - 4c_1c_4)P_o^2 - 2c_2|V_s|^2P_o + |V_s|^4 \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} c_8 &= (c_3^2 - 4c_1c_4) \\ c_9 &= 2(c_2c_3Q_o - c_2|V_s|^2) \\ c_{10} &= (c_2^2 - 4c_1c_4)Q_o^2 - 2c_2|V_s|^2Q_o + |V_s|^4 \end{aligned} \quad (37)$$

Donde:

Po: Potencia Activa resultante del flujo de potencia.

Qo: Potencia Reactiva resultado del flujo de potencia.

Por lo tanto, el valor de Qmin y Pmin se puede calcular como:

$$Q_{min} = \frac{-c_6 + \sqrt{c_6^2 - 4c_5c_7}}{2c_5} \quad (38)$$

$$P_{min} = \frac{-c_9 + \sqrt{c_9^2 - 4c_8c_{10}}}{2c_8} \quad (39)$$

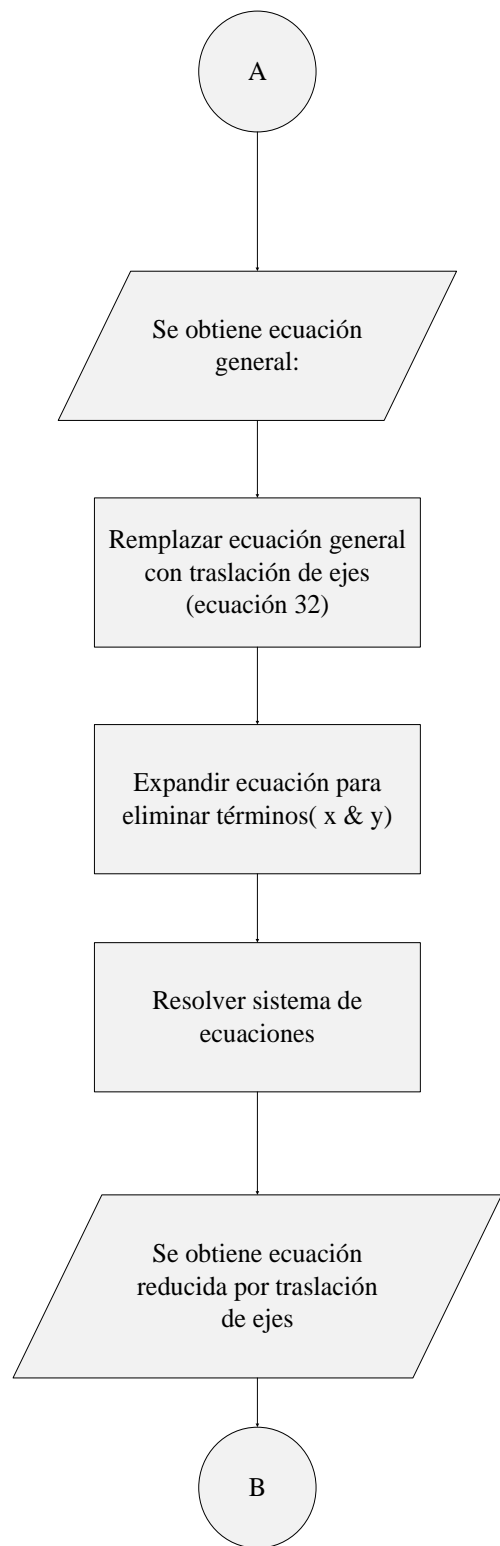
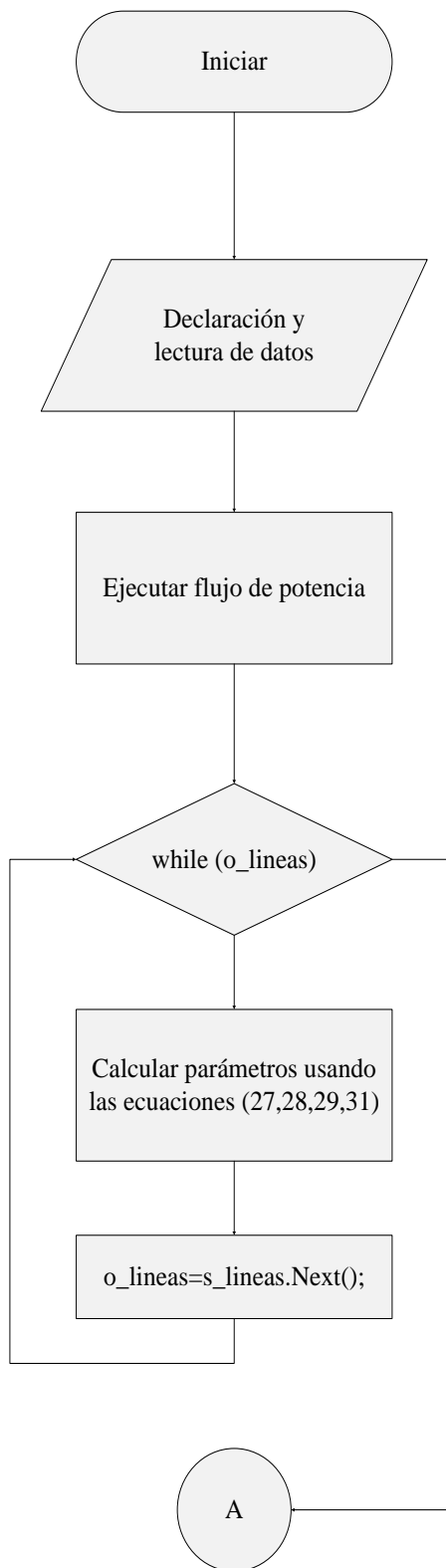
Por último, para calcular el área donde se encuentra el sistema estable se aplica la siguiente formula y se denota como *Sinside*.

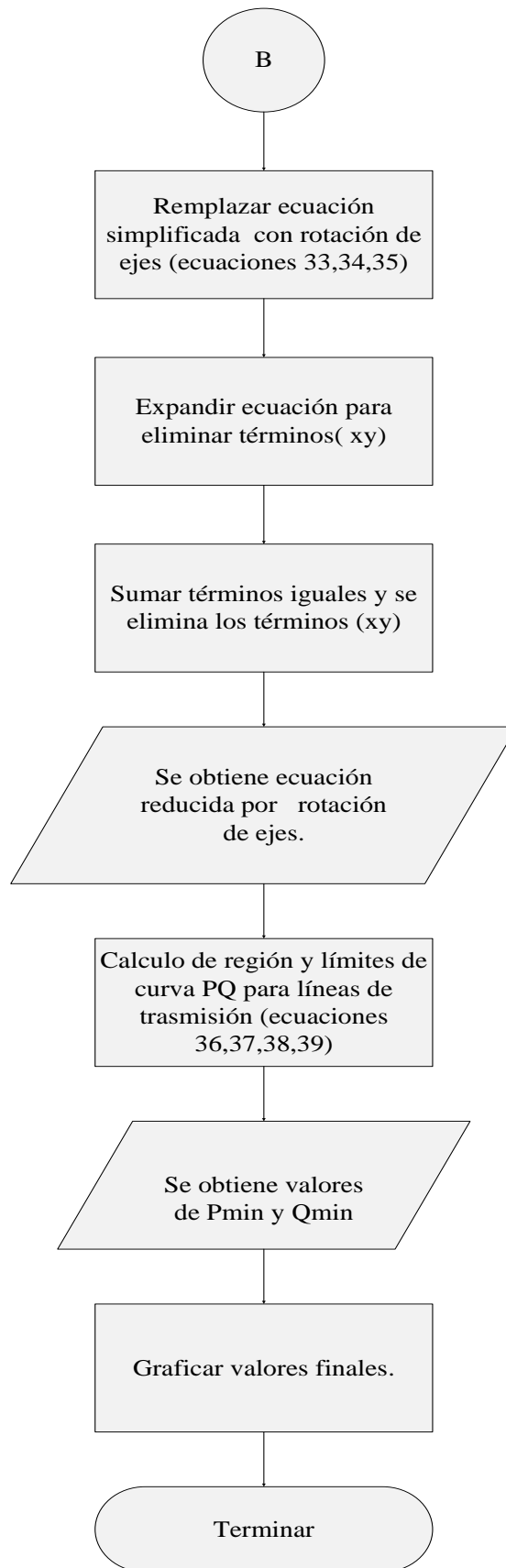
$$Sinside = -\frac{1}{2}[(Q_o - Q_{min})(P_{max} - P_o) + (Q_{max} - Q_o)(P_{min} - P_o)] \quad (40)$$

### 3.3 Descripción del programa de simulación.

En este punto se presenta la estructura del programa para obtener la curva PQ que se emplea en este proyecto para el estudio de estabilidad.

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo de una forma muy general que describe el análisis para la obtención de la curva PQ en líneas de transmisión. El hecho de realizar este tipo de simulación es para realizar el estudio de estabilidad de voltaje mediante sus límites de operación.





**Figura 5.** Diagrama de análisis para la obtención de curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami.

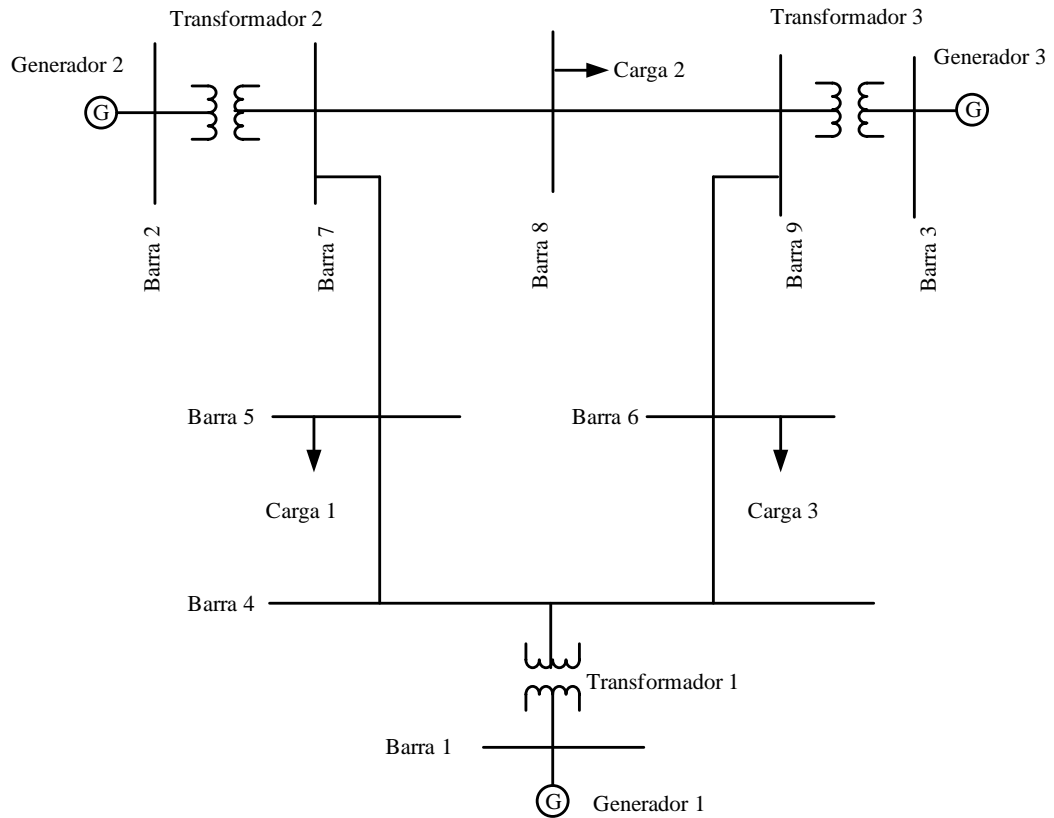
### **3.4 DIgSILENT PowerFactory.**

Se debe tomar en cuenta que el software DIgSILENT PowerFactory es usado frecuentemente alrededor del mundo, por ser una de las herramientas de diseño asistido para ingeniería, que se usa para el análisis del sistema eléctrico de potencia de diversas aplicaciones como de generación, transmisión y distribución; el cual permite realizar simulaciones, como también tiene una característica que integra diversas funciones y ayuda a obtener cálculos de redes eléctricas. Los modelos matemáticos se basan en normas y teorías aceptadas por ANSI, IEEE y IEC, y es uno de los medios computacionales más usado para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

PowerFactory tienen funciones previamente definidas, además de su propio lenguaje de programación DPL (DIgSILENT Programming Language), si se basa en dicho lenguaje es posible crear nuevas funciones de análisis o modelos de los elementos de un SEP.

### **3.5 Sistemas de prueba.**

Para realizar las gráficas PQ, se probará la programación DPL sobre el sistema IEEE de 9 barras, además del SEP de 4 barras de la referencia Análisis de Sistemas de Potencia de Grainger & Stevenson. Como se muestra en la figura 3 y figura 4.



**Figura 6.** Sistema de 9 barras de la IEEE.  
Elaborado por: Saúl Jami.

**Tabla 1.** Datos de cargas del sistema de 9 barras de la IEEE.

Barra	Carga	P [MW]	Q [Mvar]
5	Carga 1	125	50
6	Carga 2	90	30
8	Carga 3	100	35

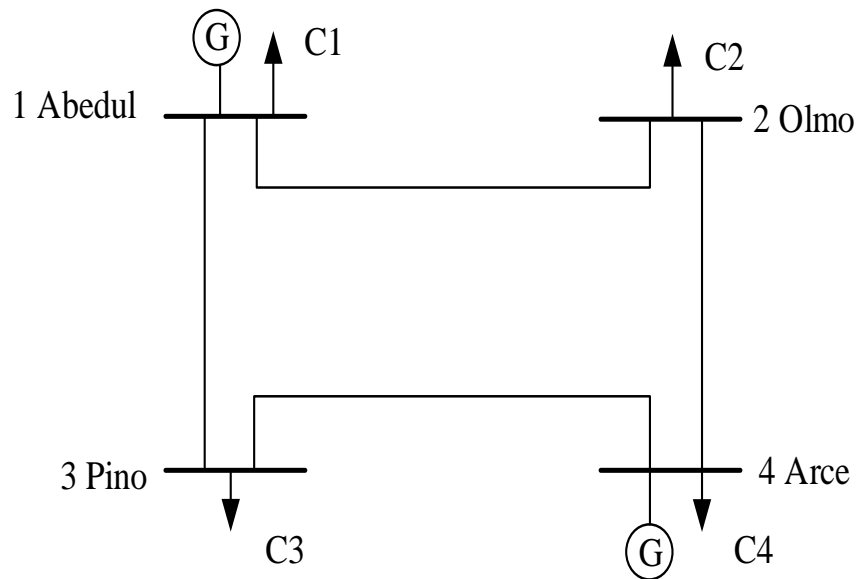
Elaborado por: Saúl Jami.

**Tabla 2.** Datos de generadores del sistema de 9 barras de la IEEE.

Barra	Generador	P [MW]	Q [Mvar]
1	Generador 1	N.A.	N.A.
2	Generador 2	163.0	1.02
3	Generador 3	85	1.02

Elaborado por: Saúl Jami.

En las tabla 1 y tabla 2, se presentan los datos del SEP de 9 barras de la IEEE, estos datos se complementan con los datos de la tabla 5.



**Figura 7.** Sistemas de Potencia de Grainger & Stevenson.  
Elaborado por: Saúl Jami.

**Tabla 3.** Datos de cargas del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Barra	Carga	P [MW]	Q [Mvar]
1	Carga 1	50	30.99
2	Carga 2	170	105.35
3	Carga 3	200	123.94
4	Carga 4	80	49.58

Elaborado por: Saúl Jami

**Tabla 4.** Datos de generadores del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Barra	Generador	P [MW]	Q [Mvar]
1	Generador 1	N.A.	N.A.
2	Generador 2	0	0
3	Generador 3	0	0
4	Generador 4	318	N.A.

Elaborado por: Saúl Jami



En la tabla 3 y tabla 4, se presentan los datos del SEP de 4 barras de Grainger & Stevenson., estos datos se complementan con los datos de la tabla 10.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADO

#### 4.1 Resultados del Sistema de 9 barras de la IEEE.

En el programa propuesto para encontrar el límite de estabilidad de voltaje utilizando la curva PQ, se ha aplicado las pruebas en el sistema que se muestra en la figura 3.

Los datos de las respectivas líneas de transmisión después de ejecutar un flujo de potencia se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** Parámetros de flujo de las líneas de transmisión del Sistema de 9 barras de la IEEE

Líneas	R [ohm/km]	X [ohm/km]	B [us/km]	R [p.u.]	X [p.u.]	B [p.u.]	Longitud [km]
Línea 1	5.29	44.97	332.7	0.01	0.085	0.176	1
Línea 2	16.93	85.17	578.45	0.032	0.161	0.306	1
Línea 3	4.5	38.09	281.66	0.0085	0.072	0.149	1
Línea 4	6.3	53.32	395.08	0.0119	0.1008	0.209	1
Línea 5	20.63	89.93	676.75	0.039	0.17	0.358	1
Línea 6	8.99	48.67	298.69	0.017	0.092	0.158	1

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 5, se presentan los valores de los parámetros de las líneas de transmisión es decir la resistencia, reactancia y susceptancia en valores reales y en por unidad [p.u.], respectivamente.

Es importante mencionar que para este ejemplo se puso un voltaje base de 230 [kV] y una potencia base de 100 [MVA].

**Tabla 6.** Coeficientes de las líneas de transmisión del Sistema de 9 barras de la IEEE.

<b>Líneas</b>	<b>c1</b>	<b>c2</b>	<b>c3</b>	<b>c4</b>
<b>Línea 1</b>	0.9703	0.02	0.1674	0.0073
<b>Línea 2</b>	0.904	0.064	0.3055	0.0269
<b>Línea 3</b>	0.9787	0.017	0.1424	0.0053
<b>Línea 4</b>	0.9583	0.0238	0.1973	0.0103
<b>Línea 5</b>	0.8822	0.078	0.3182	0.0304
<b>Línea 6</b>	0.9711	0.034	0.1812	0.0088

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 6, se presentan los coeficientes para poder formar ecuaciones generales de segundo grado.

**Tabla 7.** Ecuación general de segundo grado de las líneas de transmisión del Sistema de 9 barras de la IEEE.

<b>Líneas</b>	<b>Ecuación general de segundo grado.</b>
<b>Línea 1</b>	$-0.000400*x^2 + 0.006697*x*y - 0.028030*y^2 - 0.352336*x - 0.042090*y + 1.107214$
<b>Línea 2</b>	$-0.004096*x^2 + 0.039105*x*y - 0.093336*y^2 - 0.642916*x - 0.134682*y + 1.107130$
<b>Línea 3</b>	$-0.000289*x^2 + 0.004843*x*y - 0.020287*y^2 - 0.299738*x - 0.035775*y + 1.107130$
<b>Línea 4</b>	$-0.000566*x^2 + 0.009391*x*y - 0.038925*y^2 - 0.420533*x - 0.050730*y + 1.135828$
<b>Línea 5</b>	$-0.006084*x^2 + 0.049642*x*y - 0.101263*y^2 - 0.678284*x - 0.166257*y + 1.135828$

<b>Línea 6</b>	$-0.001156*x^2 + 0.012324*x*y - 0.032846*y^2 - 0.381404*x - 0.071552*y + 1.107214$
----------------	--

Elaborado por: Saúl Jami

Como se presenta en la tabla 7, es el resultado de realizar los cálculos correspondientes y ordenar los coeficientes, para obtener la forma de ecuación general de segundo grado.

Una vez obtenida esta información se realizan las operaciones correspondientes de traslación y rotación de ejes, para la reducción de la ecuación y poder graficar los resultados, además de analizar el tipo de gráfico obtenido.

**Tabla 8.** Coeficientes de las líneas de transmisión para cálculo del punto de operación del Sistema de 9 barras de la IEEE.

Líneas	c5	c6	c7	c8	c9	c10
Línea 1	0.0073	-0.0004	1.0855	-0.028	-0.0395	0.9708
Línea 2	0.0269	-0.0041	0.9272	-0.0933	-0.1303	1.0343
Línea 3	0.0053	-0.0003	1.0683	-0.0203	-0.0353	1.075
Línea 4	0.0103	-0.0006	1.1213	-0.0389	-0.0484	1.0336
Línea 5	0.0304	-0.0061	1.0012	-0.1013	-0.1596	1.0444
Línea 6	0.0088	-0.0012	1.0823	-0.0328	-0.0695	1.0441

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 8, se obtienen los resultados de los coeficientes para poder formar los puntos de operación de las líneas de transmisión.

**Tabla 9.** Puntos de operación del Sistema de 9 barras de la IEEE.

Líneas	Po [MW]	Qo [Mvar]	Pmin [MW]	Qmin [Mvar]	Pmax [MW]	Qmax [Mvar]	Sinside
Línea 1	40.68	38.68	6.632	877.1236	250.14	1356.9	110255
Línea 2	84.32	11.31	4.099	150.4167	623.1	1429.7	94364
Línea 3	75.9	10.70	8.200	1028	104.12	1113.5	51682
Línea 4	24.1	24.30	5.813	741.090	67.915	790.18	22706

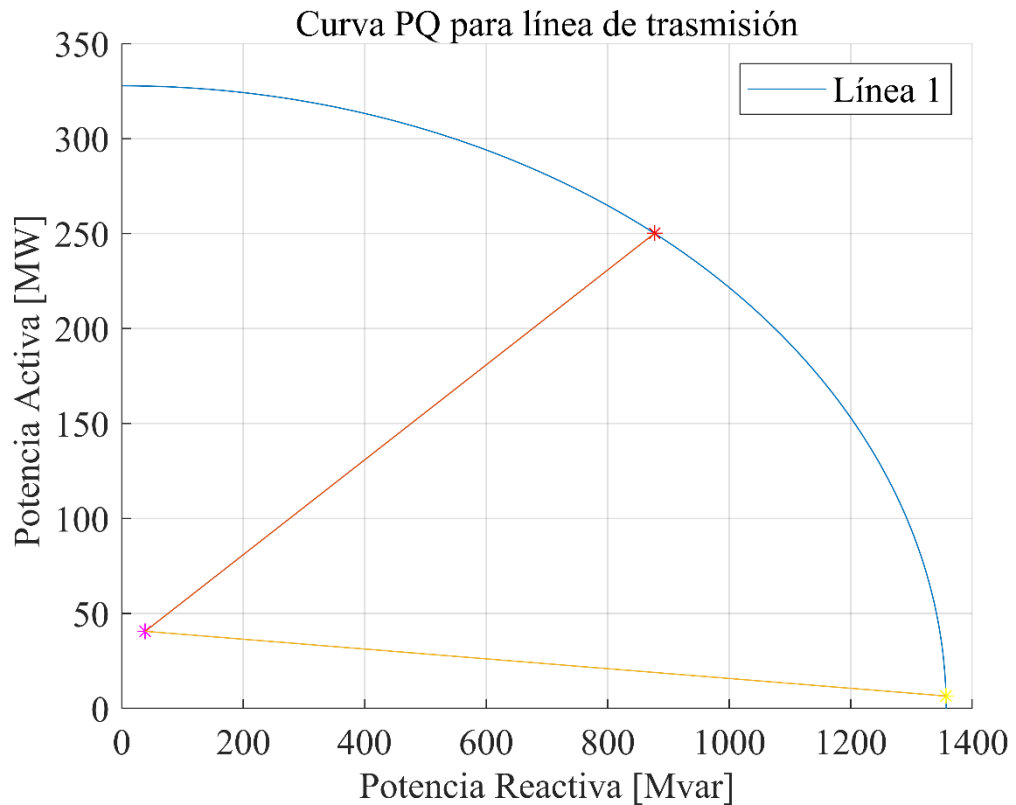
<b>Línea 5</b>	59.46	13.46	4.095	108.1562	224.71	444.13	19746
<b>Línea 6</b>	30.54	16.54	6.795	329.5199	107.91	429.59	17011

Elaborado por: Saúl Jami

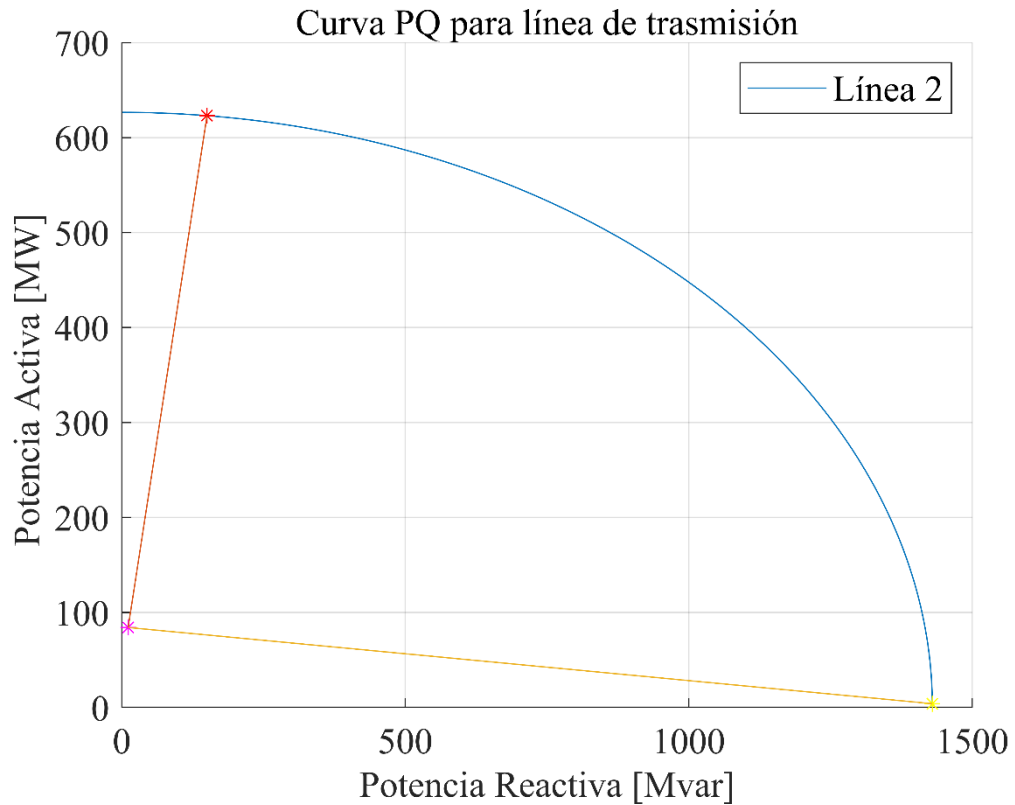
En la tabla 9, se presentan los resultados para establecer los límites de operación, donde sabemos que  $P_o$  y  $Q_o$  son el resultado de realizar un flujo de potencia al sistema, además se presenta el cálculo del área de operación que es Sinside.

#### 4.2 Análisis y comparación de resultados del Sistema de 9 barras de la IEEE.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en el modelo de 9 barras de la IEEE.

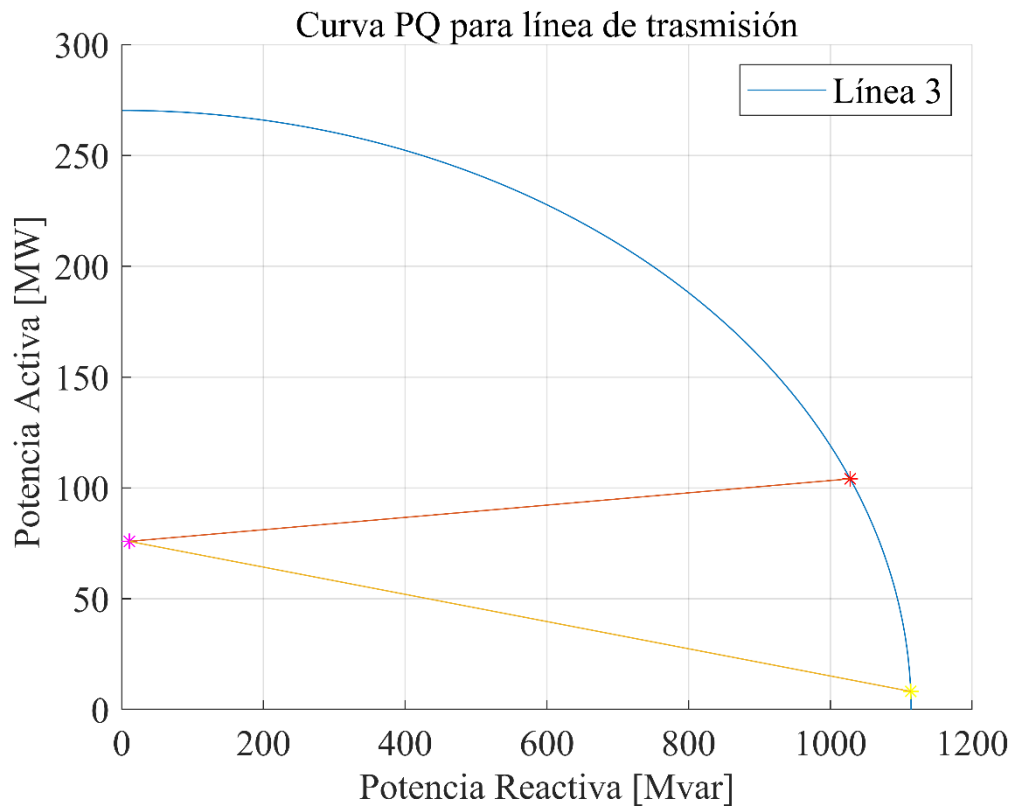


**Figura 8.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 1 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami.

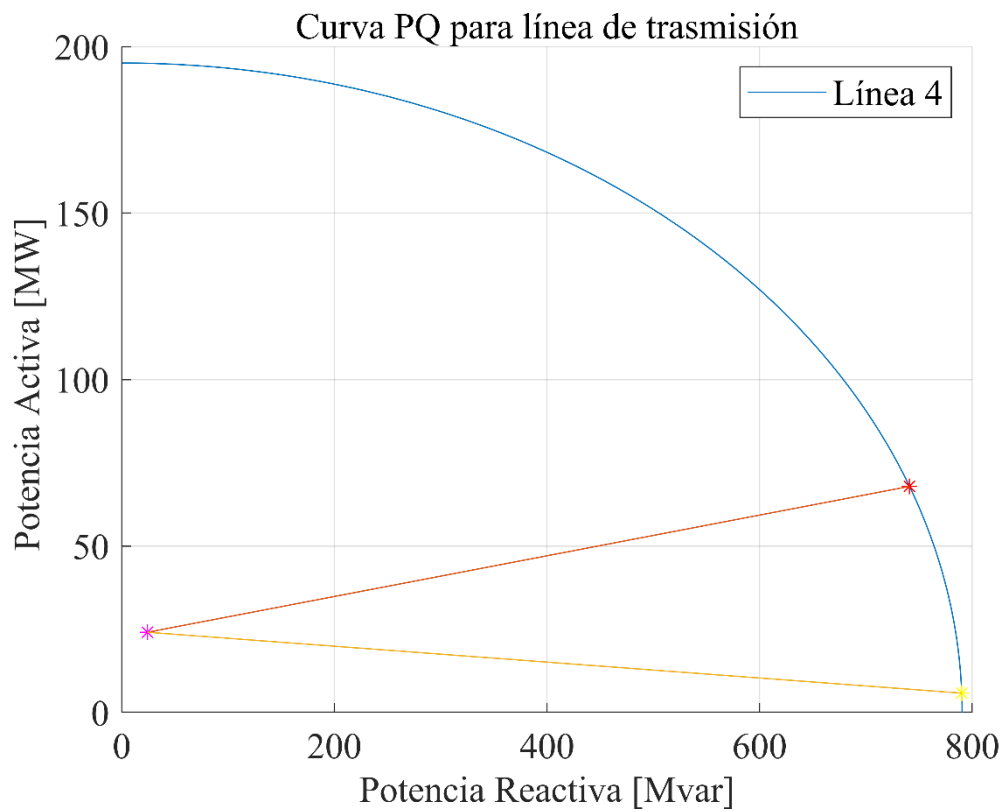


**Figura 9.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 2 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami.

Con el método propuesto para encontrar el límite de estabilidad de voltaje utilizando la curva PQ y con los resultados de la figura 8 y figura 9, muestra la línea de transmisión línea 1 y línea 2 respectivamente, con los datos mostrados en la tabla 5. La figura claramente muestra la variación de la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q), que es sensible para un punto crítico de colapso, es decir si los valores pasan por encima del punto rojo y por debajo del punto amarillo se considera una región inoperativa, por otro lado, si los valores de PQ están dentro de los límites o región, la curva nos indica que el sistema opera con normalidad.



**Figura 10.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 3 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami.

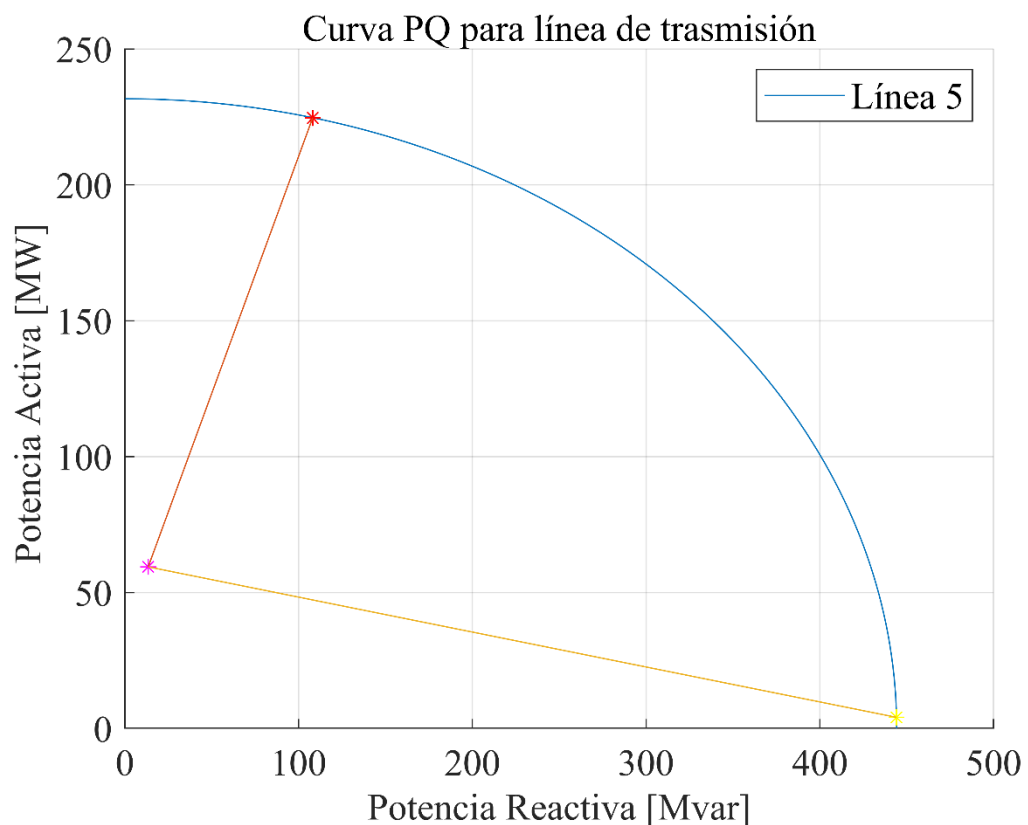


**Figura 11.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 4 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami.

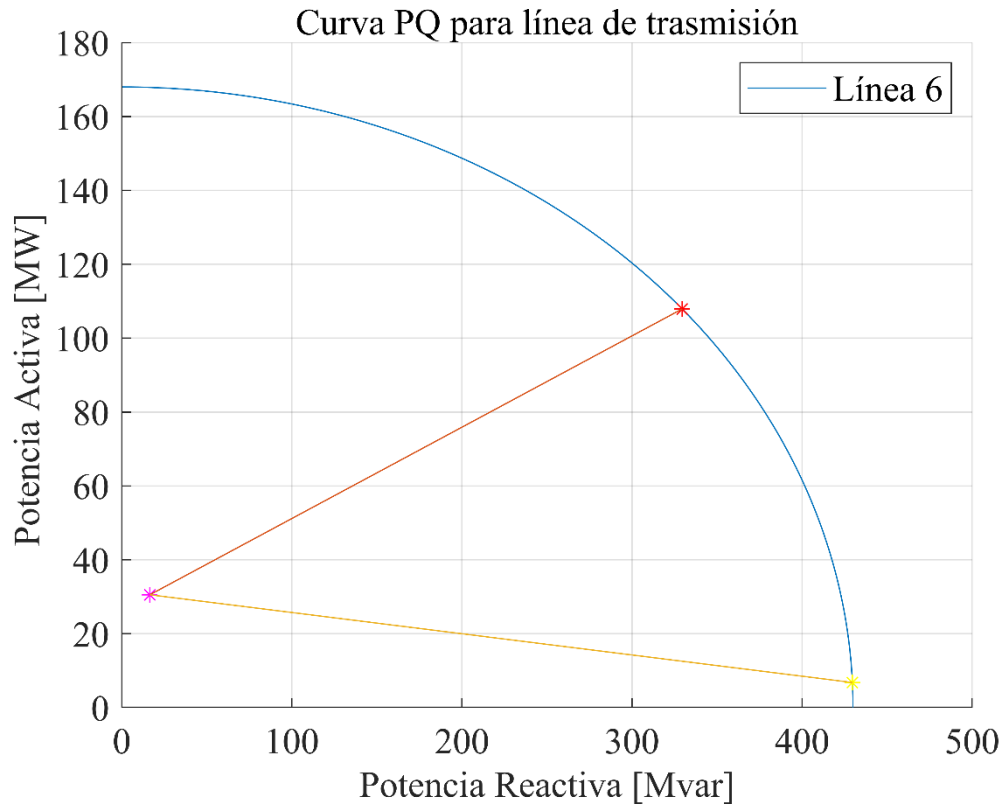
Los resultados obtenidos en la gráfica de la línea 3 y línea 4 como ya se mencionó, muestra la relación que existe entre la potencia reactiva (Q), y la potencia activa (P), y finalmente se sabe con mayor claridad el punto de operación del sistema para que este se mantenga estable, en este caso la línea 3 para que el sistema entre a un colapso debe estar por encima de una potencia activa máxima de 104.12 [MW] y una potencia reactiva mínima de 1028 [Mvar], o a su vez por debajo de una potencia activa mínima 8.2 [MW] y una potencia reactiva máxima de 1113.5 [Mvar].

Para que la línea 4 entre a un colapso debe estar por encima de una potencia máxima de 67.92 [MW] y una potencia reactiva mínima de 741.1 [Mvar], o estar por debajo de una potencia activa mínima 5.81 [MW] y una potencia reactiva máxima de 790.2 [Mvar], si PQ se encuentra dentro de estos límites el sistema opera con normalidad caso contrario el sistema vendrá a un colapso.

Para comparar estos resultados se puede guiar de la tabla 9, puntos de operación del sistema.



**Figura 12.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 5 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami



**Figura 13.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 6 del sistema IEEE de 9 barras curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami

En las figuras 12 y 13, se puede observar los resultados arrojados para la estabilidad de voltaje de la línea 5 y de la línea 6 respectivamente, dichos resultados más relevantes a destacar son el valor de 108.1562 [Mvar] que es la potencia reactiva mínima y el valor de 224.71 [MW] que es la potencia activa máxima, el valor de 4.0947 [MW] que es la potencia activa mínima y el valor de 444.13 [Mvar] que es la potencia reactiva máxima que soporta la línea 5, además de un Sinside igual a 19746 que representa el área total de estabilidad.

Por otra parte, los valores de la línea 6 a destacar son de 329.519 [Mvar] que es la potencia reactiva mínima y el valor de 107.91 [MW] que es la potencia activa máxima, el valor de 6.79 [MW] que es la potencia activa mínima y el valor de 429.59 [Mvar] que es la potencia reactiva máxima que soporta la línea 5, además de un Sinside igual a 17011 que representa el área total de estabilidad.



### 4.3 Resultados del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

**Tabla 10.** Parámetros de flujo de las líneas de transmisión del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Líneas	R [ohm/km]	X [ohm/km]	B [us/km]	R [p.u.]	X [p.u.]	B [p.u.]	Longitud [km]
<b>Línea 1-2</b>	5.3323	26.6616	193.7618	0.0101	0.0504	0.1025	1
<b>Línea 3-1</b>	3.9357	19.6788	146.5028	0.0074	0.0372	0.0775	1
<b>Línea 2-4</b>	3.9357	19.6788	146.5028	0.0074	0.0372	0.0775	1
<b>Línea 4-3</b>	6.7288	33.6444	241.0208	0.0127	0.0636	0.1275	1

Elaborado por: Saúl Jami

Del mismo modo que el sistema de 9 barras de la IEEE, en la tabla 10 se presentan los datos de las respectivas líneas de transmisión, después de ejecutar un flujo de potencia al SEP de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Es importante mencionar que para este ejemplo se puso un voltaje base de 230 [kV] y una potencia base de 100 [MVA].

**Tabla 11.** Coeficientes de las líneas de transmisión del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Líneas	c1	c2	c3	c4
<b>Línea 1-2</b>	0.9897	0.0202	0.1003	0.0026
<b>Línea 3-1</b>	0.9942	0.0149	0.0742	0.0014
<b>Línea 2-4</b>	0.9942	0.0149	0.0742	0.0014
<b>Línea 4-3</b>	0.9839	0.0254	0.1261	0.0042

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 11, se presentan los coeficientes del SEP de 4 barras de Grainger & Stevenson, para poder formar la ecuación general de segundo grado.

**Tabla 12.** Ecuación general de segundo grado de las líneas de transmisión del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Líneas	Ecuación general de segundo Grado.
<b>Línea 1-2</b>	$-0.000406*x^2+0.004042*x*y-0.010052*y^2-0.200517*x-0.040320*y+1.000000$
<b>Línea 3-1</b>	$-0.000221*x^2+0.002208*x*y-0.005502*y^2-0.148354*x-0.029760*y+1.000000$
<b>Línea 2-4</b>	$-0.000221*x^2+0.002208*x*y-0.005502*y^2-0.154347*x-0.030962*y+1.082432$
<b>Línea 4-3</b>	$-0.000647*x^2+0.006417*x*y-0.015908*y^2-0.262446*x-0.052936*y+1.082432$

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 12, se presentan los resultados de realizar los cálculos correspondientes y ordenar los coeficientes, para obtener la forma de ecuación general de segundo grado.

Una vez obtenida esta información se realizan las operaciones correspondientes de traslación y rotación de ejes, para la reducción de la ecuación y poder graficar los resultados, además de analizar el tipo de gráficos obtenidos.

**Tabla 13.** Coeficientes de las líneas de transmisión para cálculo del punto de operación del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

Líneas	c5	c6	c7	c8	c9	c10
<b>Línea 1-2</b>	0.0026	-0.0004	0.983	-0.0101	-0.0391	0.9373
<b>Línea 3-1</b>	0.0014	-0.0002	0.9659	-0.0055	-0.0284	0.9056
<b>Línea 2-4</b>	0.0014	-0.0002	1.0322	-0.0055	-0.0293	0.9679
<b>Línea 4-3</b>	0.0042	-0.0006	1.0111	-0.0159	-0.0491	0.9238

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 13, se obtienen los resultados de los coeficientes, para poder formar los puntos de operación de las líneas de transmisión del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

**Tabla 14.** Puntos de operación del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.

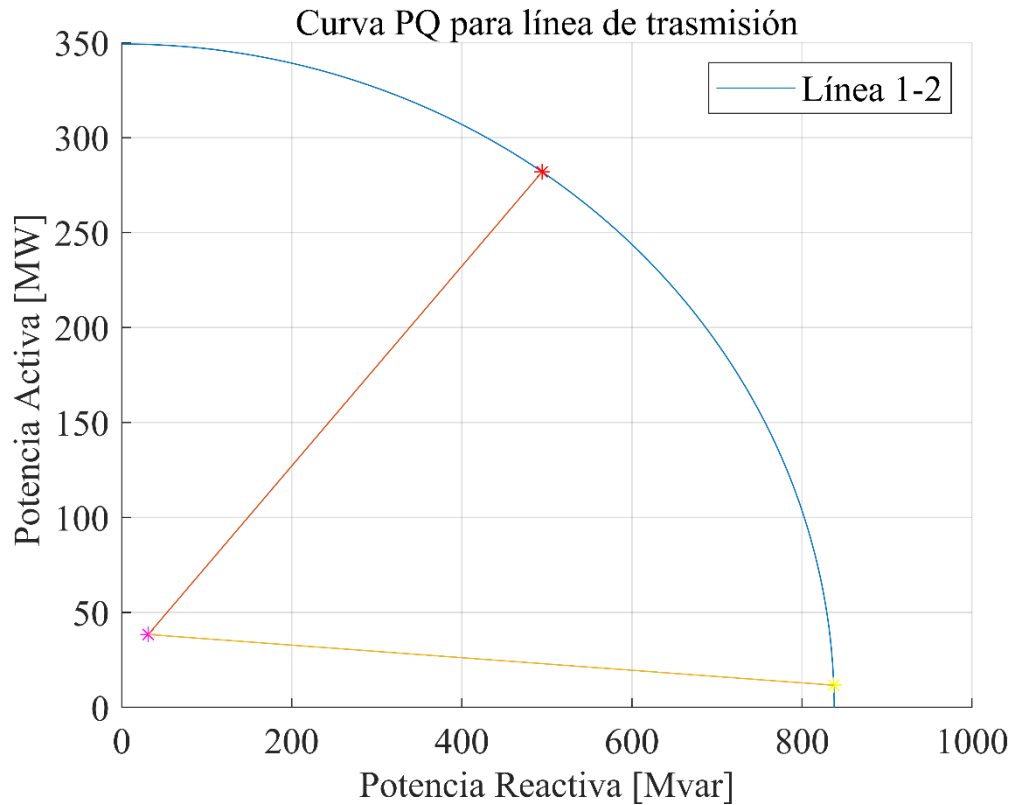
<b>Líneas</b>	<b>Po [MW]</b>	<b>Qo [Mvar]</b>	<b>Pmin [MW]</b>	<b>Qmin [Mvar]</b>	<b>Pmax [MW]</b>	<b>Qmax [Mvar]</b>	<b>Sinside</b>
<b>Línea 1-2</b>	38.46	31.24	11.7929	494.4327	281.98	837.36	67146
<b>Línea 3-1</b>	97.09	63.57	15.6623	666.8901	1070.2	2647.9	398777
<b>Línea 2-4</b>	131.54	74.12	16.1932	690.7321	1131.3	2750.7	457133
<b>Línea 4-3</b>	102.91	60.37	9.3167	399.2221	646.07	1588.3	163533

Elaborado por: Saúl Jami

En la tabla 14, como se puede apreciar son los resultados para establecer los límites de operación de las líneas de transmisión, donde ya se conoce que Po y Qo son los resultados de flujo de potencia del SEP, los demás puntos Pmin, Qmin, Pmax, Qmax, son valores utilizados para establecer los límites de estabilidad, además cuenta con el valor del área que está representada como Sinside.

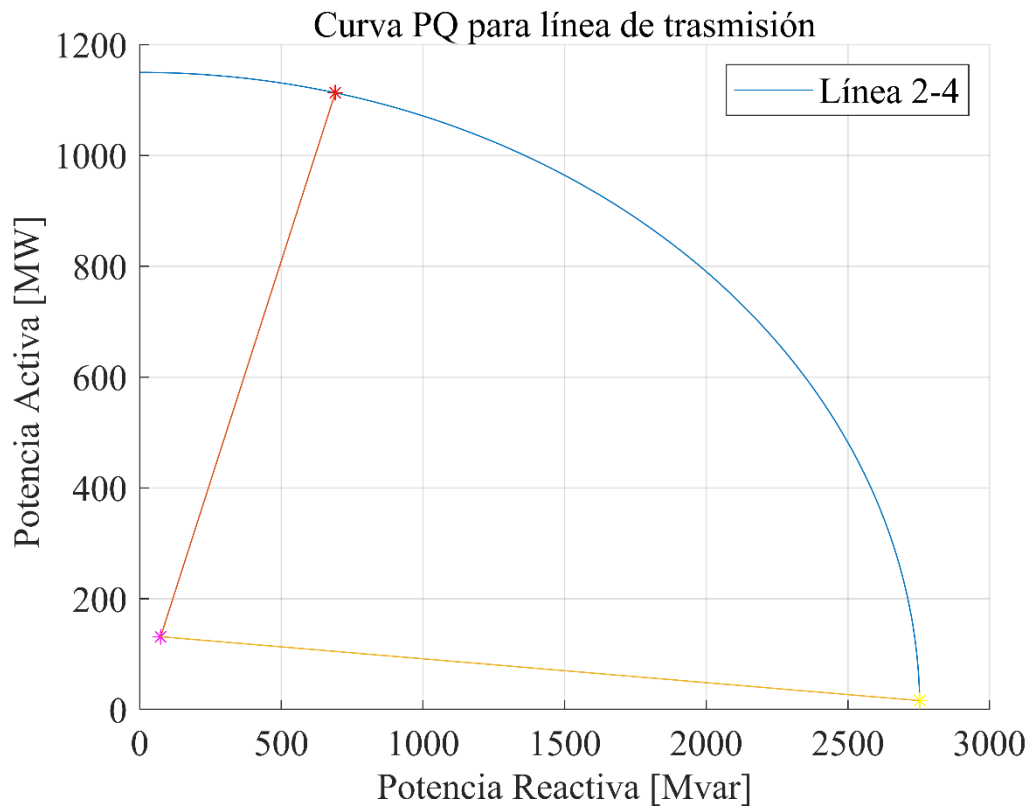
#### **4.4 Análisis y comparación de resultados del Sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson.**

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en el modelo de 4 barras de Grainger & Stevenson.

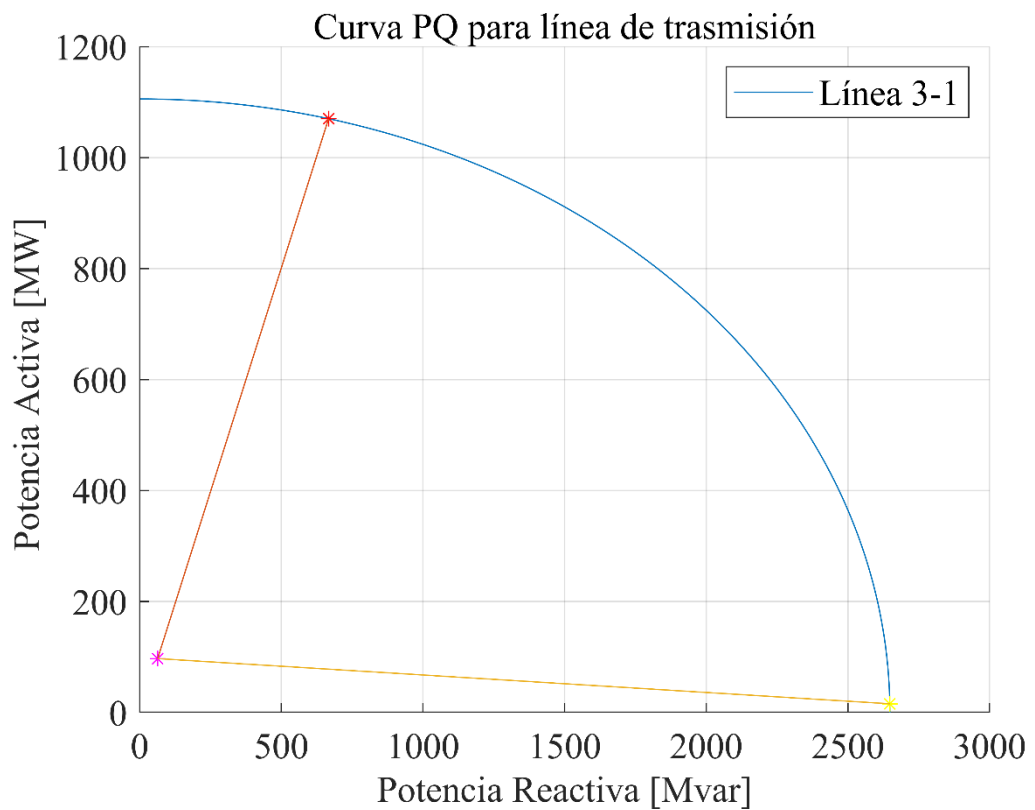


**Figura 14.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 1-2 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami.

La figura 14, muestra la línea de transmisión línea 1-2 del SEP de 4 barras de Grainger & Stevenson, con los datos mostrados en la tabla 6, el gráfico muestra los valores de la potencia activa máxima igual a 281.98 [MW], y la potencia reactiva mínima igual a 494.4327 [Mvar], que es sensible para un punto crítico de colapso, es decir si los valores pasan por encima de estos se considera una región inoperativa, por otro lado, si los valores de PQ están por debajo de una potencia activa mínima de 11.7929 [MW], y la potencia reactiva máxima de 837.36 [Mvar], también se considera una zona inoperativa por parte de la línea 1-2, dentro de los límites o región mencionados, la curva nos indica que el sistema opera con normalidad.



**Figura 15.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 2-4 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami

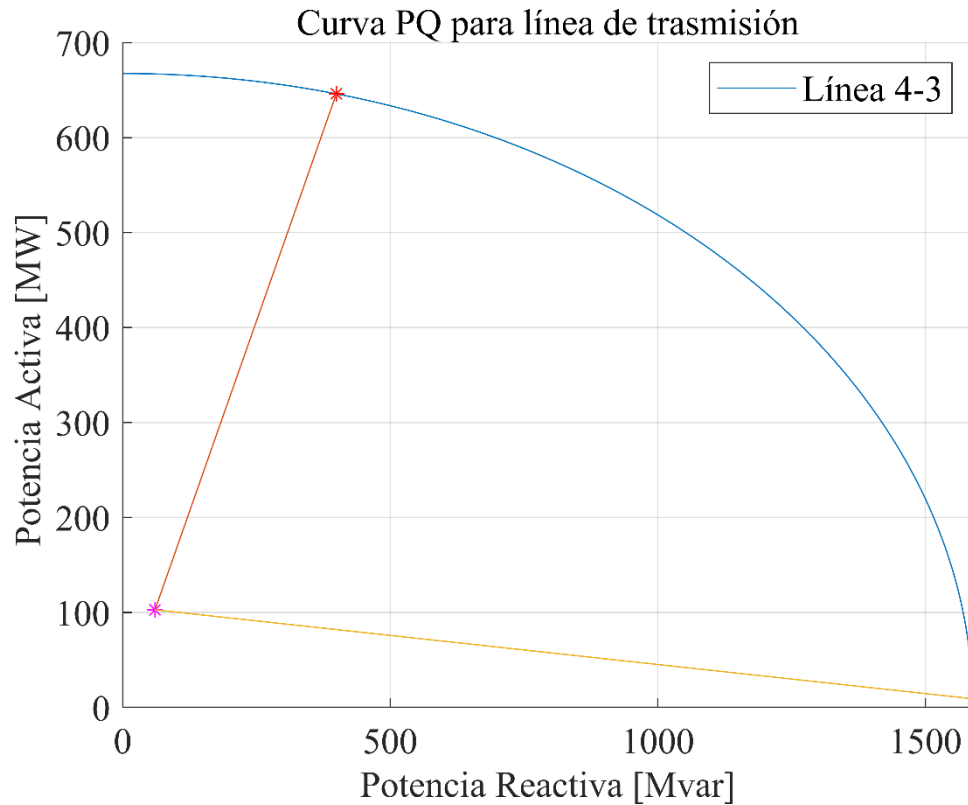


**Figura 16.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 3-1 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ.

En las figuras 15 y figura 16, se puede observar que la forma de la curva PQ son casi similares, esto se debe a que los valores de los parámetros de la resistencia, reactancia y susceptancia para estas líneas son los mismos, es por eso que los coeficientes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  también son los mismos, por el contrario, los cálculos de flujo de potencia varían así mismo los puntos de colapso de las líneas, estos valores se pueden comprobar en la tabla 11 y tabla 14.

Teniendo como resultados arrojados para la estabilidad de voltaje de la línea 3-1, los valores de potencia activa máxima igual a 1070.2 [MW], y el valor de 666.8901 [Mvar] que es la potencia reactiva mínima, para que el sistema entre a un colapso debe superar dichos valores o estar por debajo de una potencia reactiva máxima de 2647.9 [Mvar] y una potencia activa mínima de 15.6623 [MW], asimismo cuenta con un Sinside igual a 398777.

Por otro lado, para la línea 2-4 los valores de potencia activa máxima igual a 1131.3 [MW], y el valor de 690.7321 [Mvar] que es la potencia reactiva mínima, para que el sistema entre a un colapso debe superar dichos valores o estar por debajo de una potencia reactiva máxima de 2753.2 [Mvar] y una potencia activa mínima de 16.1932 [MW], asimismo cuenta con un Sinside igual a 457133.



**Figura 17.** Límite de estabilidad de voltaje de la línea 4-3 del sistema de 4 barras de Grainger & Stevenson, curva PQ.  
Elaborado por: Saúl Jami

Los resultados obtenidos en la gráfica 17 de la línea 4-3 como las demás graficas resultantes, muestra la relación que existe entre la potencia reactiva (Q), y la potencia activa (P), en este caso la línea 4-3, para que el sistema entre a un colapso debe superar el valor de 399.22 [Mvar] que es la potencia reactiva mínima y el valor de 646.07 [MW] que es la potencia activa máxima, y estar por debajo del valor de 9.3167 [MW] que es la potencia activa mínima y el valor de 1588.3 [Mvar] que es la potencia reactiva máxima que soporta la línea 4-3, asimismo cuenta con un Sinside igual a 163533 que representa el área total de estabilidad.

## CONCLUSIONES

El presente proyecto se aplica las curvas PQ, mediante el desarrollo de métodos informáticos y matemáticos por medio del software DIgSILENT PowerFactory, para describir todos los coeficientes de las líneas de transmisión, y así las ecuaciones requeridas dando como resultado una elipse con centro en el origen, para el análisis de estabilidad de voltaje mediante los márgenes o límites de potencia reactiva y potencia activa de las líneas; los límites de estabilidad mencionados facilitan información útil para posibles amenazas de colapso de voltaje.

Para determinar una curva PQ de una línea de transmisión se debe utilizar una gran cantidad de parámetros de una línea como es la resistencia de la línea, reactancia de la línea y su susceptancia de la línea, además de realizar un flujo de potencia para enviar un voltaje de nodo a nodo y obtener los valores de potencia reactiva y potencia activa y con esto poder conseguir los límites de estabilidad, por último, se obtiene el área estable de cada línea de transmisión.

Los resultados de la simulación muestran que las curvas PQ, se aplican para el estudio y análisis de los márgenes de estabilidad de las líneas de transmisión en estado estacionario, estos resultados son intuitivos, lo que permite que su velocidad de cálculo sea más rápida.

Como se aprecia en los resultados obtenidos todas las líneas de transmisión tienen la misma forma de curva PQ, esto es gracias a que el sistema presenta una ecuación exacta para el límite de estabilidad de voltaje lo que hace que el método de cálculo sea adaptativo a cualquier SEP.



## **RECOMENDACIONES**

Con los frutos adquiridos se puede llevar a cabo pruebas adicionales para el análisis de estabilidad de voltaje aplicando curvas PQ, considerando datos de un sistema eléctrico de potencia más grande.

Realizar una investigación adicional con respecto a la forma de obtener las curvas PQ ya que el método planteado en el presente trabajo no es el único y así poder observar los diferentes escenarios y comparar resultados que se obtengan.

Incorporar modelos de sistemas de potencia adicionales como modelos estacionarios de carga, a fin de incorporar la dependencia de la potencia consumida por las cargas de acuerdo al voltaje de su alimentación.

## REFERENCIAS

- [1] Zhaomin and Fanyinhai, "The voltage stability research of ship electric power system," *Conf. Proc. - IPEMC 2006 CES/IEEE 5th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, vol. 3, pp. 1968–1972, 2007, doi: 10.1109/IPEMC.2006.297422.
- [2] J. Wu, H. Wang, L. Yao, Z. Kang, and Q. Zhang, "Comprehensive evaluation of voltage stability based on EW-AHP and Fuzzy-TOPSIS," *Heliyon*, vol. 5, no. 10, p. e02410, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02410.
- [3] X. Kou and F. Li, "P-Q curve based voltage stability analysis considering wind power," *2017 4th Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1180–1184, 2017, doi: 10.1109/CoDIT.2017.8102760.
- [4] R. Mujal Rosas, "Tecnología Eléctrica EL SISTEMA ELÉCTRICO," vol. 1. pp. 305–311, 2000.
- [5] G. D. R. V. Carlos Luis Vásquez Ubilla, "Análisis del flujo de potencia en líneas de transmisión largas, usando el banco de pruebas para líneas de transmisión de la UPS-Sede Guayaquil," *Univ. Politec. Sales.*, vol. 1, pp. 1–179, 2017.
- [6] F. Gonzalez-longatt, "Elementos de Líneas de Transmisión Aéreas," vol. 1, no. February, pp. 2–11, 2016.
- [7] F. Gonzalez-longatt, "Impedancia Serie en Lineas de Transmision.," vol. Volumen 2, no. February, pp. 1–29, 2016.
- [8] I. Power and E. Society, "IEEE Guide for the Parameter Measurement of AC Transmission Lines 0HDVXUHPHQW RI \$ & 7UDQVPLVVLRQ / LQHV." 2019.
- [9] Stevens, "Análisis de sistemas electricos de potencia." pp. 1–500, Springer, 2012.
- [10] A. R. Tirado Trujillo, "ANÁLISIS DE MODELOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN." p. 166, 2013.
- [11] C. Campos, "CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA Y CONTROL DE LA DEMANDA," *Guía para implementación de sistema integral de gestión de energía\_UPME*. p. 17, 2011.
- [12] Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, "Energía eléctrica: conceptos y principios básicos," 2018. p. 11, 2018.
- [13] E. Industrials and R. M. Mujal, "Cálculo de líneas y redes eléctricas." Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC Jordi Girona Salgado 31, p.

- [14] Silvester Sandra, “Impedancias en Paralelo :” Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario, Rosario, pp. 231–248.
- [15] Gabriela Cristina Cabrera Celi, “Estudio de colapso de voltaje del sistema nacional interconectado para el año 2014 mediante una aplicación desarrollada en Matlab,” 2015.
- [16] SAMUEL DOMÍNGUEZ BECERRIL, “MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.” pp. 1–12, 2013.
- [17] G. Alfonso and P. Cabrera, “Guía para modelado de estabilidad en sistemas de potencia,” p. 87, 2017.
- [18] I. A. Ortiz, S. A. Pil, I. J. Játiva, and D. Ph, “Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable del Sistema de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Quito,” no. Xc.
- [19] C. M. M. Espejo Raul, “Indicadores de estabilidad.” Revista Universidad Eafi, p. 53.
- [20] C. J. Zapata, “Colapsos de voltaje en sistema de potencia,” *Curso Técnico sobre Tópicos la Desregularización del Sect. Eléctrico, ACIEM*, pp. 1–9, 1996.
- [21] V. Stability and U. P-q, “IEEE Medal for Engineering Excellence Award,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no. 5, pp. 39–39, 2008, doi: 10.1109/mpwr.2002.4312169.
- [22] C. G. Játiva J., Constante G., “Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia,” *Rev. Politécnica*, vol. 33, no. 3, p. 7, 2014.
- [23] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA*, McGRAW-HIL. México: 1996.
- [24] R. Paosateanpun, S. Chusanapiputt, and S. Phoomvuthisarn, “Curve for Steady-State,” no. XI, pp. 1–7, 2006.
- [25] J. H. Kindle, “Teoría y Problemas de Geometría Anlítica Plana y del Espacio,” 1989.

## ANEXOS

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl

Name:

General Selection:

Input parameters:

	Type	Name	Value	Unit	Description
▶ 1	double	Sbase	100	KV	Voltaje Base
2	double	Vbase	230	MVA	Potencia Base

External Objects:

	Name	object	Description
▶ 1			

Buttons: Execute, Close, Cancel, Save, Check, Contents

**Anexo 1.** Declaración de variables externas en DPL

Elaborado por: Saúl Jami

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl

Program text

```

set s_lineas;      !Definir un conjunto de objetos internos
object o_lineas;   !Definir un objeto

!***** Auxiliar *****
int mostrarParametros; !Declaración de variable entera
!*****

!Declaración de variable Doubles para valores de los Coeficientes
double c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10;
! Declaración de variable Doubles para Potencias
double Pmin, Qmin, Po, Qo;
!Declaración de variable Doubles par Coeficientes ecuación general
double A, B, C, D, E, F;
!Declaración de variable Doubles para Impedancia base, Resistencia,
!Reactancia, Susceptancia
double Zbase, R, XL, BC;
!Declaración de variable Doubles para Voltaje
double Vs;
!Declaración de variable Doubles para Ángulos de voltaje
double delta1, delta2;
!Declaración de variable Doubles para Ángulos de rotación
double c2auxiliar, c3auxiliar, cos_teta, sin_teta, cos2_teta, sin2_teta;
!Distancia al punto de colapso de voltaje
double k, dv_max;

mostrarParametros = 1; !1: muestra los parámetros (R,X,B)
                       !0: no se visualizan los parámetros
!*****

```

Buttons: Execute, Close, Cancel, Save, Check, Contents

Ln 1, Col 1

**Anexo 2.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl

Basic Options  
Advanced Options  
**Script**  
Description  
Version

```

Program text
!*****
!*****      ClearOutput(); ! Limpia variables de la Ventana
!*****
! A continuación, se crea un General set con el nombre LINEAS
! Y lo almacena en la variable o_lineas estos comandos van siempre.

s_lineas = LINEAS.AllElm();
o_lineas = s_lineas.First();

!Ejecuta Flujo de Potencia
LoadFLOW.Execute();

!*****
!*****      ! Cálculos
!*****
!Fórmula para sacar la Zbase

Zbase = (pow(Vbase,2))/Sbase;
!Imprimir los valores de Voltaje base, Potencia base y Z base
printf('Voltaje base= %.4f[Kv] \tPotencia base = %.4f[MVA] ',Vbase,Sbase)
printf('\tImpedancia base = %.4f[ohm]',Zbase);
!Crear un archivo de una extensión tipo csv
!se indica la dirección donde se crea el archivo
fopen('C:\Users\crist\Desktop\Datos9barras.csv','w',0);
!Ciclo while para ejecutar el bloque de código
!mientras que la condición cumpla o sea verdadera
while(o_lineas){

```

Execute  
Close  
Cancel  
Save  
Check  
Contents

Ln 15, Col 62

**Anexo 3.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl

Basic Options  
Advanced Options  
**Script**  
Description  
Version

```

Program text
! Ciclo while para ejecutar el bloque de código
!mientras que la condición cumpla o sea verdadera
while(o_lineas){
!Imprimir los nombres y tipo de las líneas
printf('%s ',o_lineas:loc_name);
printf('%s:*****',o_lineas:typ_id);
!Cálculo en [pu] de las variables
R = (o_lineas:Rl)/Zbase;
XL = (o_lineas:XL)/Zbase;
BC = (o_lineas:t:bline/pow(10,6))*Zbase;

!Cálculo de los coeficientes para encontrar parámetros A,B,C,D,E,F

c1 = pow(1-(XL*BC),2)+pow(R*BC,2);
c2 = 2*R;
c3 = 2*(XL-pow(XL,2)*BC-pow(R,2)*BC);
c4 = pow(R,2)+pow(XL,2);

!Auxiliares para evaluar los ángulos de las líneas
delta1 = o_lineas:n:phi_u:0;
delta2 = o_lineas:n:phi_u:1;
!Condición para evaluar que valor de potencia se debe utilizar
if (delta1>delta2){
Vs = o_lineas:n:u:0;
!printf('Opción 1');
Po = -o_lineas:m:P:1/Sbase;
Qo = -o_lineas:m:Q:1/Sbase;

```

Execute  
Close  
Cancel  
Save  
Check  
Contents

Ln 49, Col 64

**Anexo 4.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl
Basic Options
Advanced Options
Script
Description
Version

Program text
!Condicional para evaluar que valor de potencia se debe utilizar
if (deltal>delta2){
    Vs = o_lineas:n:u:0;
    !printf('Opción 1');
    Po = -o_lineas:m:P:1/Sbase;
    Qo = -o_lineas:m:Q:1/Sbase;
}
else{
    Vs = o_lineas:n:u:1;
    !printf('Opción 2');

    Po = -o_lineas:m:P:0/Sbase;
    Qo = -o_lineas:m:Q:0/Sbase;
}

!*****
! Calculo de ángulo para uso en ecuación de rotation
!aqui se determina ademas los ejes x=P o y=Q
!caso contrario x=Q o y=P
    c3auxiliar=pow(c3,2);
    c2auxiliar=pow(c2,2);
    printf('c2auxiliar= %.4f \tc3auxiliar = %.4f',c2auxiliar,c3auxiliar);

if ( c3auxiliar>c2auxiliar){
    printf('x=Q \y=P');
    cos_teta= (abs(c3) / (sqrt(pow(c3,2)+pow(c2,2))));
}

Ln 73, Col 64

```

**Anexo 5.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl
Basic Options
Advanced Options
Script
Description
Version

Program text
if ( c3auxiliar>c2auxiliar){
    printf('x=Q \y=P');
    cos_teta= (abs(c3) / (sqrt(pow(c3,2)+pow(c2,2))));
    sin_teta= (abs(c2) / (sqrt(pow(c3,2)+pow(c2,2))));

    printf('cos_teta= %.4f \tsin_teta = %.4f ',cos_teta,sin_teta);
}
else{
    printf('x=P \y=Q');
    cos_teta= (abs(c2) / (sqrt(pow(c3,2)+pow(c2,2))));
    sin_teta= (abs(c3) / (sqrt(pow(c3,2)+pow(c2,2))));
    printf('cos_teta= %.4f \tsin_teta = %.4f ',cos_teta,sin_teta);
}

!*****
!Calculo de los coeficientes A, B, C, D, E, F

A = pow(c3,2)-4*c1*c4;
B = 2*c2*c3;
C = pow(c2,2)-4*c1*c4;
D = -2*c3*pow(Vs,2);
E = -2*c2*pow(Vs,2);
F = pow(Vs,4);
!calculo para valores de los Coeficiente

Ln 97, Col 43

```

**Anexo 6.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

DPL Command - Scripts\PARAMETROS PARA CURVA PQ.ComDpl

Basic Options  
Advanced Options  
**Script**  
Description  
Version

Program text

```

c5 = pow(c3,2)-4*c1*c4;
c6 = 2*(c2*c3*Po-c3*pow(Vs,2));
c7 = (pow(c2,2)-4*c1*c4)*pow(Po,2)-2*c2*pow(Vs,2)*Po+pow(Vs,4);
Qmin = (-c6+sqrt(pow(c6,2)-4*c5*c7))/(2*c5);
c8 = (pow(c2,2)-4*c1*c4);
c9 = 2*(c2*c3*Qo-c2*pow(Vs,2));
c10 = (pow(c3,2)-4*c1*c4)*pow(Qo,2)-2*c3*pow(Vs,2)*Qo+pow(Vs,4);
Pmin = (-c9+sqrt(pow(c9,2)-4*c8*c10))/(2*c8);
! Condicional para visualizar los resultados en la pantalla de salida
if (mostrarParametros == 1){
printf('R = %.4f[pu] \tX = %.4f[pu] \tB = %.4f[pu]',R,XL,BC);
printf('Voltaje %.4f',Vs);
printf('Coeficientes');
printf('c1 = %.4f c2 = %.4f c3 = %.4f c4 = %.4f',c1,c2,c3,c4);
printf('Ecuacion general');
printf(' %fx^2+ %f x*y %fy^2 %fx %fy +%f',A,B,C,D,E,F);
printf('Coeficientes');
printf('c5 = %.4f c6 = %.4f c7 = %.4f ',c4,c5,c7);
printf('c8 = %.4f c9 = %.4f c10 = %.4f ',c8,c9,c10);
printf('Resultados del flujo de potencia');
printf('Po = %.4f\tQo = %.4f',Po,Qo);
printf('Pmin: %.4f\tQmin: %.4f',Pmin,Qmin);
}
! Guardar los resultados los resultados en el archivo punto csv
fprintf(0, '%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;%.4f;');
! Retro alimentador para parar o continuar con el lazo While
o_lineas = s_lineas.Next();
}

```

MOD OVR READ Ln 149, Col 65

Execute  
Close  
Cancel  
Save  
Check  
Contents

**Anexo 7.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

Editor - C:\Users\crist\Desktop\prueba\_curva\_saul.m

Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP\_4BARRAS.m x prueba\_curva\_saul.m x +

```

1 - clc; clearvars; clear all; close all
2 - warning('off','all');
3 - %Lectura de los coeficientes A,B,C,D,E,F,Qmin,Pmin,Po,Qo,costeta,senteta
4 - ap=xlsread('Datos9barras.csv','A1:A1');
5 - bp=xlsread('Datos9barras.csv','B1:B1');
6 - cp=xlsread('Datos9barras.csv','C1:C1');
7 - dp=xlsread('Datos9barras.csv','D1:D1');
8 - ep=xlsread('Datos9barras.csv','E1:E1');
9 - in=xlsread('Datos9barras.csv','F1:F1');
10 - Qmin=abs(xlsread('Datos9barras.csv','H1:H1'));
11 - Pmin=abs(xlsread('Datos9barras.csv','I1:I1'));
12 - Po=abs(xlsread('Datos9barras.csv','J1:J1'))*100;
13 - Qo=abs(xlsread('Datos9barras.csv','K1:K1'))*100;
14 - costeta=xlsread('Datos9barras.csv','L1:L1');
15 - senteta=xlsread('Datos9barras.csv','M1:M1');

```

**Anexo 8.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\cris\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
16 %Declaración de las variables simbólicas
17 syms x y xl h y1 k;
18 fprintf('Ecuacion general')% imprimir
19 f = (ap*x^2+bp*x*y+cp*y^2+dp*x+ep*y+in) % función inicial
20 xt = xl+h; % Ecuacion de traslacion
21 yt = y1+k; %Ecuacion de traslacion
22 f = subs(f,[x,y],[xt,yt]); % reemplaza en f inicial las ecuaciones xt y yt
23 f = expand(f); % expande la ecuación para que se puedan eliminar términos
24 f = collect(f,[xl y1]); % agrupa los términos en función de xl y y1
25 fl = children(f); % children separa cada término. Como los que nos interesan
26 % se encuentran ya agrupados, estos tendran una posicion especifica en la
27 % matriz que se genera
28
29 ex1 = children(fl(3)); % Separo las ecuaciones ** AQUI SE ASUME QUE SIEMPRE
30 ex2 = children(fl(5)); % ESTARÁN EN LA POSICIÓN 3 Y 5 - DE NO SER ASI, HABRÍA
31 % QUE BUSCAR LA FORMA DE IDENTIFICAR AUTOMATICAMENTE DONDE SE ALMACENAN **
32
33 eq1 = ex1(1)==0; % Igualo las dos ecuaciones a 0
34 eq2 = ex2(1)==0;% Igualo las dos ecuaciones a 0

```

## Anexo 9. Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\cris\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
32
33 eq1 = ex1(1)==0; % Igualo las dos ecuaciones a 0
34 eq2 = ex2(1)==0;% Igualo las dos ecuaciones a 0
35
36 [h1,k1] = solve([eq1,eq2],[h k]); % Resuelvo el sistema de ecuaciones hallando h y k
37 fprintf('Ecuacion reducia por traslacion');% imprimir
38 f = subs(f,[h,k],[h1,k1]) % Reemplazo los valores encontrados en la función f
39
40 c = children(f) %Separo con children cada término, específicamente, para obtener el valor constante
41 % **EN EL CASO DE QUE NO EXISTA UN VALOR CONSTANTE ES IMPORTANTE QUE EL
42 % VALOR DE CHILDREN NO SEA UNA EXPRESIÓN **
43 % Para verificar si la c contiene una constante o una simbolica se usa
44 % nuevamente children ** SI LA LONGITUD DE CHILDREN ES MAYOR A 1 SIGNIFICA
45 % QUE EN c(end) existe una variable **
46
47 if length(children(c(end)))==1, c = c(end); else, c = 0; end
48
49 % Separar la constante sirve para restarla a la expresión y poder obtener
50 % los coeficientes A, B y C. Por ejemplo: Queremos obtener el coeficiente A
51 % y sabemos que A es el coeficiente de x^2.
52 % Supongamos que se tiene esta expresión: 9x^2+3xy+y^2-5.
53 % 1. En c ya se ha almacenado previamente la constante, es decir -5.
54 % 2. Al restar f-c, obtendría: 9x^2+3xy+y^2 (sin el -5)
55 % 3. Con subs asigno cero a las variables que no me interesan, es decir,

```

## Anexo 10. Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami



```

Editor - C:\Users\crist\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
55 % 3. Con subs asigno cero a las variables que no me interesan, es decir,
56 % como quiero sacar el coeficiente de x^2, entonces pongo 0s en xy & y^2
57 % 4. Tras realizar la substitución tendre: 9x^2, ahora con children separo
58 % la variable del coeficiente. la variable A será ahora un vector de 1x2.
59 % 5. Con A(end) tomo el elemento 1,2 correspondiente a la cosntante
60 - D=(subs(f,[x1^2 x1*y1 y1^2],[0 0 0]));
61 - D = D(end);
62 - A = children(subs(f-D,[x1*y1 y1^2],[0 0]));
63 - A = A(end);
64 - B = children(subs(f-D,[x1^2 y1^2],[0 0]));
65 - B = B(end);
66 - C = children(subs(f-D,[x1^2 x1*y1],[0 0]));
67 - C = C(end);
68 - syms x2 y2 ;
69 %Formulas de rotacion
70 - xt=x2*coseteta+y2*senteteta;
71 - yt=-x2*senteteta+y2*coseteta;
72
73 - fnueva = subs(f,[x1,y1],[xt,yt]);% Se reemplaza xt & yt en la función
74 - fnueva = expand(fnueva); % se expande la función para eliminar términos semejantes%
75 - faux = children(fnueva);% Ahora separo la constante de la función.
76 % Nuevamente supongamos que tengo la expresión 9x^2+5y^2-5.
77 % 1. En faux(end) habré almacenado el -5
78 % 2. A la función le resto el valor de faux(end), por lo que quedara como

```

### Anexo 11. Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\crist\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
78 % 2. A la función le resto el valor de faux(end), por lo que quedara como
79 % 9x^2+5y^2-5-(-5) ? 9x^2+5y^2.
80 % 3. Ahora la igualo al valor de -faux(end), es decir: 9x^2+5y^2 = 5.
81 % *EL PASO 2 Y 3 EQUIVALEN A RESTAR A AMBOS LADOS DE LA ECUACIÓN UN NÚMERO**
82 % 4. Ahora a la expresión la divido para el valor absoluto de la f(aux), es
83 % decir 5. Con esto obtengo (9/5)x^2+y^2 = 1
84 - fnueva = fnueva - double(faux(end)) == double(-faux(end))
85 - fnueva = fnueva/double(abs(faux(end)))
86 - funcion_simplificada=simplify(fnueva)
87
88 - funcion_simplificada=collect(funcion_simplificada,[x2,y2])
89
90 - coef = children(rhs(funcion_simplificada))
91
92 - if length(coef)>1
93 -     funcion_simplificada = (lhs(funcion_simplificada)-coef(1))/double(coef(end))...
94 -     == (rhs(funcion_simplificada)-coef(1))/double(coef(end))
95 - else
96 -     funcion_simplificada = funcion_simplificada/double(coef(end)) ;
97 - end
98
99 - coef = children(funcion_simplificada);
100 - coef = children(coef(1));
101

```

### Anexo 12. Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\cris\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
99 - coef = children(function_simplificada);
100 - coef = children(coef(1));
101
102
103 - digits(5);
104 - for i=1:length(coef)
105 -     aux = children(coef(i));
106 -     coef(i) = prod([double(aux(end)) aux(1:end-1)]);
107 - end
108
109 - if length(coef)==3
110 -     aux = children(function_simplificada);
111 -     aval = children(subs(aux(1),[x2^2,y2^2],[0 0]));
112 -     if aval(end)<1e-16
113 -         coef = subs(aux(1),x2*y2,0);
114 -     end
115 - end
116
117 - if length(coef)==3
118 -     fprintf(2,'Error');
119 - else
120 -     fprintf('Ecuacion reducia por rotacion')
121
122 - function_S = vpa(coef)-1

```

**Anexo 13.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\cris\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
122 - function_S = vpa(coef)-1
123
124 - %ezplot(function_S);
125 - end
126 - %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
127
128 - syms x2 y2;
129 - %De la funcion_S que es el resultado de la rotacion y traslacion
130 - %despejamos la funcion para x es decir dejamos expresado en termino de y2^2
131 - %para remplazar el y2^2 por el valor de de Pmin y asi encontrar el valor de Qmax
132 - despeje=solve(function_S,x2);
133 - Qmax=subs(despeje,y2,Pmin);
134 - Qmax=subs(despeje,y2,Pmin);
135 - Qmax=Qmax(Qmax>0)
136
137 - %de la misma forma De la funcion_S que es el resultado de la rotacion y traslacion
138 - %despejamos la funcion para y es decir dejamos expresado en termino de x2^2
139 - %para remplazar el x2^2 por el valor de de Pmin y asi encontrar el valor de Pmax
140 - despeje2=solve(function_S,y2);
141 - Pmax=subs(despeje2,x2,Qmin);
142 - Pmax=Pmax(Pmax>0)
143 - %A qui se aplica la formula para encontrar el area ABC
144 - %que es el are donde la linea se encuentra en un estado estable
145 - Sinsidel = -1/2*((Qc-Qmin)*(Pmax-Po)+(Qmax-Qc)*(Pmin-Po))

```

**Anexo 14.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\cris\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
145 - Sinsidel = -1/2*((Qo-Qmin)*(Pmax-Po)+(Qmax-Qo)*(Pmin-Po))
146 - % A continuación se realiza un arreglo matemático para poder obtener
147 - % una ecuación de una elipse y así poder sacar los vértices de esta
148 - % ecuación para realizar la gráfica correspondiente
149 - % esta parte se comprobo con un graficador en linea Sybolab https://es.symbolab.com/graphing-calculator
150 - %la cual da el mismo resultado.
151 - funcion_S = children(funcion_S);
152 - a = coeffs(funcion_S(1));
153 - funcion_S=funcion_S/a;
154 - [num, den]=numden(funcion_S);
155 - num1=coeffs (numden(funcion_S(1)));
156 - num2=coeffs (numden(funcion_S(2)));
157 - num3=coeffs (numden(funcion_S(3)));
158 - den1=((den(1)));
159 - den2=((den(2)));
160 - den3=((den(3)));
161 - f1=(num1/den1)*(num2/den2);
162 - f2=(num2/den2)/(num2/den2);
163 - f3=(num3/den3)/(num2/den2)*(-1);
164 - fld=f1*f3;
165 - f2d=f2*f3;
166 - f3d=f3/f3;
167 - %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
168 - figure(1);

```

**Anexo 15.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl Jami

```

Editor - C:\Users\cris\Desktop\prueba_curva_saul.m
Untitled2.m x grafica.m x Untitled3.m x definitiva.m x Untitled2.m x SEP_4BARRAS.m x prueba_curva_saul.m x +
168 - figure(1);
169 - a=abs(sqrt(fld));
170 - b=abs(sqrt(f2d));
171 - x0=0; % x0,y0 centro de la elipse
172 - y0=0;
173 - t=0:0.01:pi;
174 - x=x0+a*cos(t);
175 - y=y0+b*sin(t);
176 - plot(x(x>0),y(x>0));
177 - c=0;
178 - fprintf('vertices eje x');
179 - v1=[a c];
180 - fprintf('vertices eje y');
181 - v3=[b c];
182 - hold on;
183 - C=plot(Qmin(Qmin>0),Pmax,'r'); %Donde el punto maximo de operación.
184 - B=plot(Qmax,Pmin(Pmin>0),'y'); %Donde el punto minimo de operación.
185 - A=plot(Qo,Po,'m'); %Donde el punto A representa el punto de operación actual
186 - %se unen los puntos para una mejor visualización.
187 - plot([Qo,Qmin(Qmin>0)], [Po,Pmax(Pmax>0)]); plot([Qo,Qmax], [Po,Pmin(Pmin>0)]);
188 - grid on;
189 -
190 - %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

**Anexo 16.** Código para la obtención de los parámetros de la curva PQ.

Elaborado por: Saúl